Kleyers Encyklopädie.



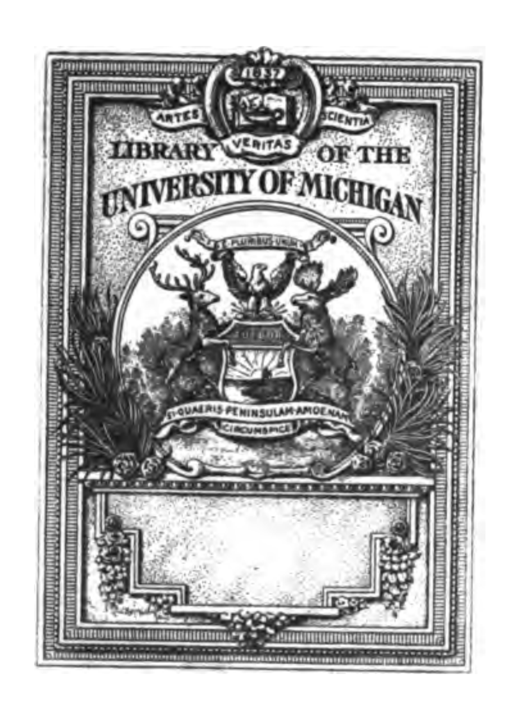


Lehrbuch der Akustik

Dritter Band 1. Teil

von

Richard Klimpert


1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE

Lehrbuch der Akustik.

Dritter Band.

I. Teil:

Die Fortpflanzungserscheinungen des Schalles, nebst den Erscheinungen zusammengesetzter Schwingungsbewegungen.

Mit

393 Erklärungen und 235 in den Text gedruckten Figuren

nebst einer

Sammlung von 66 gelösten und analogen ungelösten Aufgaben, nebst den Resultaten der lezteren.

Für das Selbststudium und zum Gebrauche an Lehranstalten

bearbeitet

nach System Kleyer

von

Richard Klimpert.

Bremerhaven und Leipzig.
Verlag von L. v. Vangerow.
1907.

Vorwort.

Während im ersten Bande das Wesen der schwingenden Bewegung im allgemeinen, und die musikalischen Töne im besonderen behandelt sind, vermittelt der zweite Band eine gründliche Kenntnisnahme der verschiedenen Tonerreger, und im vorliegenden dritten Bande unseres Lehrbuches der Akustik endlich beschäftigen wir uns mit den gesamten Fortpflanzungserscheinungen des Schalles einschließlich der damit zusammenhängenden Erscheinungen des Zusammentreffens verschiedener Schallwellen.

Beginnend mit der Ermittelung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in den Körpern verschiedener Aggregatformen, ist zunächst gezeigt, auf welchem Wege Newton aus der Elastizität und der Dichte der atmosphärischen Luft die Schallgeschwindigkeit in diesem Medium berechnete, aber ein Resultat erhielt, welches erst durch die von Laplace vorgenommene Korrektur, unter Berücksichtigung des Ausdehnungskoeffizienten der Luft, auf seinen mit der Wirklichkeit übereinstimmenden Wert berechnet wurde. Bestätigt wurde die Richtigkeit der Laplaceschen Bestimmung durch die Versuche der Pariser Akademie im Jahre 1822, sowie später durch die Regnaultschen Versuche, welche zugleich den Einfluß der Gasdichte auf die Schallgeschwindigkeit zeigten. Durch Königs Methode der akustischen Koinzidenzen, oder durch Dulongs Bestimmung mittelst Orgelpfeifen, sowie durch Anwendung der Kundtschen Staubfiguren wurde es möglich, auch in kleinen Räumen die Schallgeschwindigkeit genau zu ermitteln.

Auf dem nämlichen Wege wurde auch die Schallgeschwindigkeit für flüssige Körper zunächst theoretisch, dann durch Colladon und Sturm in großem Maßstabe am Genfer See, durch Wertheims Wasserpfeife und Kundts Staubfiguren aber im Experimentierzimmer bestimmt, und ein analoges Verfahren wurde auch für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern eingeschlagen.

Wir erfahren ferner, dass die Intensität eines wahrgenommenen Schalles von mancherlei Faktoren, z. B. von der Körpermasse der Schallquelle, der Schwingungsweite, Schwingungszahl, dem schallverbreitenden Medium, der Windrichtung usw. abhängig ist, und durch Kommunikations-, Hör- und Sprachröhren wesentlich gesteigert

werden kann. Selbstverständlich mußten hierbei auch die akustischen Seezeichen oder Nebelsignale erwähnt werden, gleichwie die von Tyndall beobachteten Erscheinungen akustischer Undurchlässigkeiten und Luftechos. Auch die neu eingeführten Unterwasser-Glockensignale haben Erwähnung gefunden.

Stellen sich den Schallwellen poröse Körper in den Weg, so findet eine Schwächung derselben statt, weshalb derartige Körper als Schalldämpfer bei Musikinstrumenten und in der Technik Anwendung finden. Stellen sich den Schallwellen leichtbewegliche Körperchen in den Weg, so treten akustische Bewegungserscheinungen auf, wie sie an Dvoraks Torsionswage oder dem Schallradiometer zu sehen sind; treffen aber die Schallstrahlen auf starre feste Wände, so zeigen sich die verschiedenen Reflexions- und Beugungserscheinungen. Ist hierbei die Tonquelle in rascher Bewegung, so finden gleichzeitig Tonhöhenänderungen statt. Sind dagegen die den Schallwellen entgegenstehenden Wände sehr elastisch, so tritt Resonanz und Mittönen ein, worauf die Wirkung und Anwendung der Resonanzböden beruht, durch welche wieder die Klangfarbe eines Musikinstruments beeinflußt wird.

Sind mehrere Schallquellen zugleich wirksam, so treten komplizierte Schwingungsbewegungen auf, deren Kurven durch die verschiedenen Phonautographen, Harmono- und Vibrographen mechanisch aufgezeichnet werden, oder durch die optische Methode von Lissajous einem großen Auditorium vorgeführt werden können. Die hier gebotenen hochinteressanten Schwingungskurven der musikalischen Intervalle werden des Beifalls der Leser nicht ermangeln.

Auch die Haupteigenschaften eines Klanges sind das Resultat mehrerer zugleich auftretenden Schwingungsformen; es werden darum die klanganalysierenden Membranen und Resonatoren mit und ohne Flammenapparat, gleichwie die den Klang aus Partialtönen zusammensetzenden Vokalapparate, Wellen- und Telephonsirenen, eingehend besprochen, und auch der vielumstrittene Einfluß der Phasendifferenz auf die Klangfarbe allseitig beleuchtet.

Aus diesen Klanguntersuchungen ist ersichtlich, wie durch die Art und Zahl der Obertöne die Klangfarbe der verschiedenen Musikinstrumente, sowie die der menschlichen Stimme bedingt wird. Die Helmholtz'schen Gesetze, sowie die Untersuchungen von Graßmann, Auerbach und Lahr über die Vokalklänge finden gebührende Berücksichtigung.

Es wird weiter gezeigt, wie die Erscheinungen der Schallinterferenz mittelst Klangplatten, Stimmgabeln, Pfeifen, verschiedenen Sirenen und Interferenzröhren vorzuführen sind, wie Schwebungen an Orgelpfeifen, Stimmgabeln und Sirenen zu beobachten sind, und wie sich die objektive Existenz der Kombinationstöne mittelst des Stoßtöneapparates, des phonischen Rades und der Wellensirenen nachweisen läßt.

Den Schluß des vorliegenden Bandes bildet die Betrachtung unseres Gehörorganes. Seine Beschreibung ist eine derart gründliche, und der Text durch so zahlreiche Figuren unter-

stützt, dass nach dem Studium desselben ein Zweifel über die Wirkungsweise der einzelnen Teile unseres Gehörorganes bei Aufnahme der von außen kommenden Schallwellen kaum noch bestehen dürfte.

In allen Teilen des vorliegenden Lehrbuches der Akustik sind die in Fachzeitschriften mitgeteilten neuen Versuchsanordnungen soweit dieselben sich mit einfachen Lehrmitteln ausführen lassen und tatsächlich praktisch bewährte Verbesserungen und Ergänzungen darstellen, tunlichst berücksichtigt und durch Textillustration veranschaulicht worden.

Inwieweit die physikalischen Gesetze bei der Konstruktion von Kirchenräumen, Theatern und Konzertsälen zu berücksichtigen sind, um eine sogenannte gute Akustik zu erzielen, das soll in dem folgenden, weniger umfangreichen Schlußbande erörtert werden.

Bremen, den 1. Februar 1907.

Richard Klimpert.

Inhalts-Verzeichnis.

Seite

Alphabetisches Sachregister.

Die Ziffern bedeuten die Seitenzahlen.

A.

B.

C.

D.

E.

F.

G.

H.

I.

K.

L.

M.

N.

O.

P.

Q.

R.

S.

T.

U.

V.

W.

Z.

Akustik

oder

Die Lehre vom Schalle.

I. Die Fortpflanzungserscheinungen des Schalles.

Anmerkung XXIV. Bei unseren Betrachtungen über das Wesen der Schallwellen im I. Bande des vorliegenden Lehrbuches der Akustik haben wir bereits erfahren, in welcher Weise sich die Schallwellen von dem Orte ihrer Entstehung aus im Raume fortpflanzen. Zum besseren Verständnis der nun folgenden Erörterungen über die Fortpflanzungs - Geschwindigkeit der Schallwellen mögen zunächst an dieser Stelle die bereits früher bewiesenen Gesetze über die Art der Schallfortpflanzung nochmals in Erinnerung gebracht werden:

1) Die Verbreitung des Schalles besteht darin, dass durch die schwingenden Bewegungen eines schallenden Körpers in anderen damit in Berührung stehenden Körpern ähnliche Bewegungen veranlasst werden. Ein Schall wird für uns wahrnehmbar, wenn die Schwingungen des schallenden Körpers von diesem bis zu unserem Ohre gelangen, wenn also zwischen Ohr und Schallquelle ein schwingungsfähiger, das heisst ein elastischer Körper sich vorfindet, welcher die Schallwellen vom Schallerreger auf unser Ohr zu übertragen vermag.

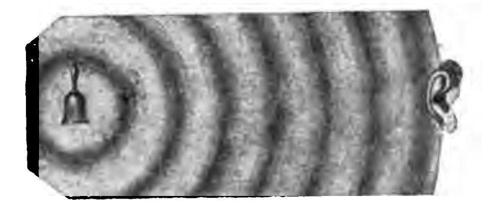
2) Alle festen und flüssigen Körper können mehr oder weniger einen Schall verbreiten; das gewöhnliche Medium für die Verbreitung des Schalles ist aber die atmosphärische Luft, weil sich die Schallerreger ebenso wie das Gehörorgan meist in der Luft befinden.

3) Ein elastischer Körper ist für den Schall ein um so besserer Leiter, je dichter, elastischer und gleichartiger er ist. Je dichter die Luft ist, um so besser pflanzt sich der Schall in derselben fort; je dünner die Luft ist, um so schlechter pflanzt sich der Schall in derselben fort, und durch den luftleeren Raum pflanzt sich der Schall nicht fort, denn der Schall besteht aus pendelartigen Schwingungen elastischer Körper, und so erfordert auch seine Fortpflanzung das Vorhandensein solcher Körper; daher kann der Schall durch den leeren Raum nicht fortgepflanzt werden.

4) Der Schall pflanzt sich von der Schallquelle aus in longitudinalen Schwingungen nach allen Richtungen des Raumes hin in geraden Strecken fort, die man Schallstrahlen oder Schalllinien nennt; folglich müssen die Gesetze der Ausbreitung des Schalles mit den Gesetzen der Verbreitung longitudinaler Wellen übereinstimmen. (Siehe I. Band der Akustik.)

5) Durch die Schwingungen des schallenden Körpers wird die denselben umgebende Luft so gestoßen, dass sich von der Schallquelle aus Luftverdichtungen und- verdünnungen in kugelförmigen Wellen nach allen Richtungen des Raumes hin fortpflanzen. Aus der Betrachtung der Tonerregung in Orgelpfeifen (siehe II. Band der Akustik) geht hervor, dass die Wellenbewegung bei

Fig. 414.



der Fortpflanzung des Schalles durch die Luft in der nämlichen Weise einen gegebenen Raum durchläuft, in welcher sie denselben Raum in einer tönenden Pfeife zurücklegt. Hieraus geht hervor, dass die Fortpflanzung des Schalles nicht mit einem Fortschreiten der Luft verbunden ist, dass sich diese vielmehr im großen und ganzen in Ruhe befindet, abgerechnet die feinen Schwingungen, die auch in den tönenden Luftsäulen der Pfeifen gefunden werden und andere Körper zum Mittönen bringen. (Seite 112, 1. Band der Akustik.)

6) Der Schall verbreitet sich nicht etwa wie das Licht bloß nach einer geraden, sondern auch nach jeder krummen Richtung. Weil nämlich die Luft nach allen Richtungen dieselbe Elastizität hat, so ist jeder Punkt eines Schallstrahles wieder als ein neuer Mittelpunkt des Schalles anzusehen, von welchem Schallwellen in alle damit noch nicht erfüllten Räume ausgehen können. Man hört also einen Schall, der hinter einem Berge, oder hinter einer dicken Mauer erregt wird, obwohl etwas schwächer, als wenn er in einer geraden Richtung hätte fortgehen können. Dass die elastische Luft ebensowohl in krummen als in geraden Linien schwingen kann, sehen wir an den verschiedenen Blasinstrumenten.

7) Die Bewegung des Schalles ist gleichförmig, so dass die Längen der durchlaufenen geraden Luftstrecken sich wie die Zeiten verhalten. Man findet den Abstand einer Welle von der andern, wenn man den Weg, welchen der Schall in einer gewissen Zeit zurücklegt, durch die Zahl der Schwingungen dividiert, welche der klingende Körper in eben der Zeit macht. Auch wird ein stärkerer oder schwächerer Schall wie auch ein höherer oder tieferer Ton auf einerlei Art und in einerlei Geschwindigkeit verbreitet.

8) Die Geschwindigkeit, welche den einzelnen schwingenden Teilchen in verschiedenen Abständen vom Mittelpunkte der Schwingung erteilt wird, ist dem Abstande der Teilchen vom Mittelpunkte der Schwingung umgekehrt proportional.

9) Die Intensität des Schalles nimmt ab, wie die Quadrate der Entfernung von der Quelle des Schalles wachsen. (Eine Folge des 5. Gesetzes.)

10) Wie an jedem elastischen Körper verschiedene schwingende Bewegungen zugleich stattfinden, so können auch mehrere Arten des Schalles zugleich durch einerlei Luftstrecke verbreitet werden, ohne dass eine dieser Bewegungen die andere hindert oder stört.

A. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft.

Frage 795. Was verstehen wir unter der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles?

Antwort. Unter der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles verstehen wir den von den Schallwellen in einer Sekunde zurückgelegten Weg.

Frage 796. Aus welchen Erscheinungen geht hervor, dass der Schall zu seiner Fortpflanzung einer bestimmten Zeit bedarf?

Erkl. 721. Ein Rammklotz, den man in größerer Entfernung niederfallen sieht, trifft den Pfahl viel eher, als der Schall von dem Aufprall unser Ohr erreicht. Schritt und Trommelschlag einer marschierenden Soldatentruppe gelangen nicht gleichzeitig zu unserer Wahrnehmung. Das Aufblitzen des Pulvers eines in großer Entfernung abgefeuerten Kanonenschusses nehmen wir merklich früher wahr, als den darauf folgenden Knall; dasselbe gilt vom Blitz und Donner bei einem Gewitter. Aehnliche Erscheinungen kommen in großer Menge vor.

Antwort. Dass der Schall zu seiner Fortpflanzung einer bestimmten Zeit bedarf, und seine Geschwindigkeit im Vergleiche zu der des Lichtes oder der Elektrizität eine nur geringe ist, davon überzeugt man sich, wenn man die schallerregende Ursache in großer Entfernung sieht und dann erst später den Schall hört. Je grösser dabei die Entfernung wird, um so grösser wird der Zeitunterschied zwischen der Wahrnehmung von Licht und Schall.

Frage 797. Hieraus ergibt sich welches allgemeine Verfahren, um die unbekannte Geschwindigkeit des Schalles zu ermitteln?

Erkl. 722. Beträgt z. B. die Entfernung zwischen Schallquelle und Beobachter 18 612,5 m und die Zeit zwischen dem Aufblitzen des Pulvers und der Wahrnehmung des Knalles 54,5 Sekunden, so ist die Schallgeschwindigkeit für den vorliegenden Fall

$$c = 186\,125 : 545$$

oder

$$c = 341 \text{ m.}$$

Ist die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft einmal bestimmt, so können wir sie zur Bestimmung von Entfernungen benutzen. Beobachten wir z. B. das Intervall zwischen der Erscheinung des Blitzes und der Ankunft des ihn begleitenden Donnerschlages, so können wir sogleich die Entfernung des Ortes der Entladung angeben, denn $s = ct$.

Antwort. Um die Geschwindigkeit des Schalles zu ermitteln, beobachtet man im allgemeinen einen stark schallenden Körper aus bedeutender, genau gemessener Entfernung. Da das Licht die irdischen Strecken in überaus kurzer Zeit durcheilt, so setzen wir die Zeit, welche das Licht zum Durchlaufen der Entfernung von der Schallquelle bis zu dem Beobachter braucht, gleich Null, und messen mit Hilfe einer Sekunden- oder Tertienuhr die Zeit, welche von der Wahrnehmung des Lichteindruckes bis zur Ankunft des Schalles am Ohre verstreicht. Bezeichnen wir diese Zeit mit t, die Entfernung mit s und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit c, so ist $c = s/t$.

---

a) Theoretische Ermittelung der Schallgeschwindigkeit.

Frage 798. Nach Satz 4) der vorausgeschickten Anmerkung XXIV. geschieht die Ausbreitung

Antwort. Der erste, welcher eine Theorie dieser Wellenbewe-

des Schalles in longitudinalen Wellen. Welcher Mathematiker hat zuerst eine Theorie dieser Wellenbewegung aufgestellt, und auf welchem Wege hat er aus dieser Theorie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles ermittelt?

Erkl. 723. Anstatt der Atmosphäre wie sie wirklich ist, und deren Dichte bekanntlich abnimmt, je weiter man in die Höhe steigt, stellen wir uns eine Atmosphäre von überall gleichförmiger Dichtigkeit vor, welche der wirklichen Atmosphäre, d. h. bei Null Grad Celsius, einer Quecksilbersäule von 76 cm oder 0,76 m Höhe das Gleichgewicht hält. Nun ist das spezifische Gewicht des Quecksilbers bei 0° 13,598 mal so groß als das des Wassers; ferner wiegt ein Kubikmeter Wasser 1000 kg, dagegen ein Kubikmeter Luft nur 1,293 kg, so dass also das spezifische Gewicht des Quecksilbers 13,598 . 1000/1,293 oder 13,598/0,001293 oder 10517 mal so groß ist als das der Luft, und es würde mithin eine Lufthülle von 10517 . 0,76 m, oder von 7992,92 m Höhe und von der Dichte der Luft am Meeresspiegel der 76 cm hohen Quecksilbersäule oder dem Drucke unserer wirklichen Atmosphäre das Gleichgewicht halten.

Nun ist die Fallgeschwindigkeit eines durch den Weg s frei fallenden Körpers $v = \sqrt{2gs}$ (siehe Lehrbuch der Dynamik, Seite 198), oder wenn wir statt s den Wert l einsetzen, so ist $v = \sqrt{2gl}$, die Schallgeschwindigkeit nach der Newton'schen Theorie ist dagegen nur $c = \sqrt{gl}$ oder $c = \sqrt{2g \cdot \frac{1}{2}l}$ oder $c = \sqrt{9{,}81 \cdot 7992{,}92}$ oder $c = 280{,}02$ m, denn die Beschleunigung g eines frei fallenden Körpers ist im Mittel 9,81 m.

Erkl. 724. Nach dem Mariotte'schen Gesetze („bei gleichbleibender Temperatur ist die Spannung eines Gases der Dichte desselben direkt proportional") würde, überall dieselbe Temperatur vorausgesetzt, der Schall auf den höchsten

gung aufgestellt hat, aus welcher dann die Geschwindigkeit der Fortpflanzung folgt, ist Newton. Nach einer allgemeinen Darstellung dieser Art der Bewegung zeigte er, dass die Geschwindigkeit der in einem elastischen Mittel fortgepflanzten Schläge oder Wellenstöße der Quadratwurzel der Elastizität der Luft direkt proportional, ferner der Quadratwurzel der Dichtigkeit der Luft umgekehrt proportional ist,

oder dass $c = \sqrt{\frac{E}{d}}$ ist. Folglich

wird (da bei Luft von konstanter Temperatur Elastizität und Dichtigkeit in demselben Verhältnisse wachsen und entgegengesetzt wirken) die Geschwindigkeit des Schalles nur dann von einer Aenderung der Dichtigkeit beeinflußt, wenn diese von einem Wechsel der Temperatur begleitet ist. In gleich dichten und gleich elastischen Medien gehen daher die Wellen mit gleicher Geschwindigeit fort. Der Hauptsatz der Theorie ist dann, dass die hin- und zurückschwingenden Teilchen der Luft nach den Gesetzen der Pendelbewegung beschleunigt und verzögert werden, wodurch das Mittel gegeben ist, aus der Dichtigkeit und der Elastizität der Luft (oder irgend eines anderen Mediums) die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schallwellen zu finden. Es müssen nämlich die Stösse der Schallwellen in derselben Zeit den Umfang eines Kreises durchlaufen, in welcher ein Pendel von der Länge l des Durchmessers dieses Kreises eine ganze Schwingung vollendet, vorausgesetzt, dass das Medium überall gleich dicht ist. (Vergleiche hiermit das, was über die geradlinig schwingende oder

Spitzen der Alpen weder schneller noch langsamer fortgehen, als im Flußtale, weil bei einer größeren oder geringeren Höhe die absolute Elastizität und die Dichtigkeit der Luft in gleichem Grade ab- und zunehmen, und also die spezifische Elastizität sich nicht ändert. Da aber die obere Luft kälter als die untere ist, so ist die Geschwindigkeit auf den Bergspitzen geringer, als am Meeresspiegel.

Vermehren wir die Elastizität der Luft, ohne zugleich ihre Dichtigkeit zu steigern, so wächst die Schallgeschwindigkeit. Lassen wir eine Verminderung der Dichtigkeit bei unveränderter Elastizität eintreten, so vermehren wir die Schallgeschwindigkeit. Erwärmen wir die Luft in einem verschlossenen Gefäße, wo sie sich nicht ausdehnen kann, so steigert sich ihre Elastizität, bei gleichbleibender Dichtigkeit, und durch so erwärmte Luft geht der Schall schneller als durch kalte Luft. Wird unsere Atmosphäre durch die Sonne erwärmt, so kann sich die Luft frei ausdehnen, ihre Dichtigkeit wird also vermindert, während ihre Elastizität dieselbe bleibt, und durch solche Luft kann der Schall schneller gehen als durch kalte Luft.

harmonische Bewegung auf Seite 16 bis 20 im I. Bande der Akustik gesagt ist.) Die Zeit einer ganzen Pendelschwingung ist aber

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

wenn die Länge des Pendels l, die Beschleunigung des freien Falles g und π die Ludolph'sche Zahl bezeichnet. (Siehe Seite 10, I. Band der Akustik.) In der nämlichen Zeit durchläuft die Schallwelle den Raum πl, und es findet also das Verhältnis

$$\pi l : \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \text{oder} \quad l : \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$\text{oder } 1 : \sqrt{\frac{1}{g\,l}} = \sqrt{g\,l} : 1$$

statt. Es ist aber $\sqrt{g\,l}$ gleich der Geschwindigkeit, welche ein durch die Höhe $\frac{1}{2}l$ im luftleeren Raume frei fallender Körper erlangen würde, also gleich der Geschwindigkeit, welche ein Körper durch den Fall von einer Höhe erhalten würde, die der halben Höhe einer überall gleich dichten Atmosphäre entspricht. Letztere läßt sich durch die Länge der Barometersäule und das Verhältnis des spezifischen Gewichts der Luft zum Quecksilber nach nebenstehender Erklärung 723 ermitteln, und hiernach muss der Schall in einer Sekunde den Weg von $c = 280$ m durchlaufen.

Frage 799. Die von Newton theoretisch berechnete Geschwindigkeit des Schalles beträgt also 280 m, während die durch zahlreiche Versuche in Wirklichkeit ermittelte Schallgeschwindigkeit wesentlich höher gefunden wurde und in trockener Luft bei einer Temperatur von 0° in der Sekunde 332,4 m beträgt. Wer löste zuerst das Rätsel der von Newton zu niedrig gefundenen Schallgeschwindigkeit, und auf welche Weise erklärt sich hiernach die Abweichung der theoretisch berechneten Geschwindigkeit des Schal-

Antwort. Newton berechnete die Geschwindigkeit des Schalles nach der Formel $c = \sqrt{E/d}$ zu 280 m (genau zu 279,93 m) unter der Annahme, dass Druck und Dichtigkeit der Gase dem Mariotte'schen Gesetze entsprechend, direkt proportional sind. Erst Laplace bemerkte, dass an allen Stellen, wo die Luftteilchen durch den Stoss der vorwärts dringenden Schallwellen zusammengedrückt werden, ihre Elastizität durch Vermehrung ihrer Dichtigkeit, sowie durch die bei

les von der in Wirklichkeit ermittelten?

Erkl. 725. Im Lehrbuche der Kalorik erfahren wir, 1) dass jede, durch mechanische Arbeit verursachte Luftverdichtung Wärme erzeugt, sowie dass 2) Abkühlung entsteht, wenn sich ausdehnende Luft bei ihrer Ausdehnung Arbeit leistet. Den ersten Satz beweist man mittelst des pneumatischen Feuerzeugs; dasselbe besteht aus einem starken Glaszylinder (Fig. 415), in den ein Kolben mit einem Handgriffe luft-

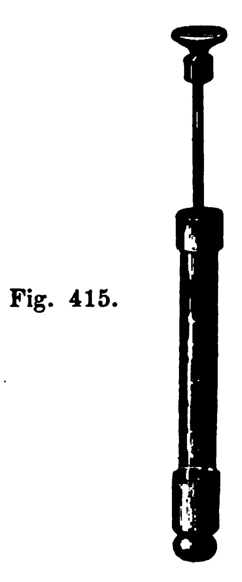


Fig. 415.

dicht paßt; stößt man den Kolben rasch nieder, so entsteht soviel Hitze, dass sich ein Stückchen Zunder oder Schießwolle entzündet, welches man vorher an der Unterseite des Kolbens befestigt hat. Der zweite Satz wird dadurch bewiesen, dass sich während des Auspumpens eine Luftpumpenglocke trübt, weil sich durch die dabei eintretende Abkühlung der Wasserdampf in derselben verdichtet und daher eine Dunstwolke bildet, die indess beim Einströmen der Luft wieder verschwindet, infolge der Wärme, welche durch die Arbeit des äusseren Luftdruckes dann erzeugt wird.

der Zusammendrückung entwickelte Wärme vermehrt und dadurch die Schallgeschwindigkeit gesteigert wird. Bei dem darauf folgenden Zustande der Verdünnung dagegen entfernen sich die Teilchen wieder voneinander, was eine gleichzeitig eintretende Temperaturabnahme, sowie eine Abnahme der elastischen Kraft der Luftteilchen zur Folge hat. Weil also die bei der Verdichtung entwickelte Wärme die Fortpflanzungs-Geschwindigkeit der Verdichtung, sowie die bei der Verdünnung entwickelte Kälte die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verdünnung (durch den gesteigerten Unterschied der elastischen Kraft) steigert, so wird auch die Geschwindigkeit der aus einer Verdichtung und einer Verdünnung bestehenden Schallwelle durch die während ihres eigenen Fortschreitens eintretenden Temperaturänderungen vermehrt, indem bei der ausserordentlich geringen Wärmeleitungsfähigkeit der Gase die Temperatur sich nicht mit der Umgebung ins Gleichgewicht setzen kann. Das im Jahre 1679 aufgefundene Mariotte'sche Gesetz gilt nur, so lange die Temperatur ungeändert bleibt. Für die in einer Schallwelle vorkommenden Druck- und Dichtigkeitsänderungen darf es also nicht angewandt werden. (Siehe Erkl. 725.)

Laplace, welcher im Jahre 1816 den merkwürdigen Grund der Nichtübereinstimmung der beiden Werte in einer Abhandlung bekannt machte, sagt darüber folgendes: „Newton hat in dem zweiten Buche der mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie einen Ausdruck für die Geschwindigkeit des Schalles gegeben. Die Art und Weise, wie er dazu gelangt, ist einer der bemer-

Erkl. 726. Die Abweichung der theoretisch berechneten Geschwindigkeit des Schalles von der in Wirklichkeit ermittelten, hat man auf folgende Weise zu erklären versucht:

1) „Es mögen wohl in der Luft viele feste oder fremde Teile enthalten sein, welche zwar das Gewicht derselben vermehren, aber deren absolute Elastizität nicht verändern und vielleicht den Schall schnell fortleiten". Dieser Vermutung widerspricht die Untersuchung der Luft, sowie auch der Umstand, dass nach den Erfahrungen der Schall bei dem stärksten Nebel- und Regenwetter, wo die Luft also viele fremde Teile enthält, in derselben Geschwindigkeit fortgeht, wie bei heiterer Witterung.

2) „Man betrachtet gewöhnlich den Schall als einen einzelnen, der Luft mitgeteilten Stoß; wenn aber mehrere aufeinander folgen, so wird vielleicht ein jeder durch die nächstfolgenden beschleunigt." Wenn diese Vermutung Eulers richtig wäre, so müßten höhere Töne schneller fortgehen als tiefere, während z. B. der Knall eines kleinen Gewehrs und einer Kanone zu gleicher Zeit gehört werden.

3) „Man hat gewöhnlich in der Theorie nur kleine Erschütterungen angenommen, dahingegen hat ein so starker Schall, wie er meistens zu den Beobachtungen angewandt wurde, schneller fortgehen müssen." Nun lehrt aber die Theorie und Erfahrung, dass die Stärke des Schalles auf seine Geschwindigkeit keinen Einfluß hat.

4) „Bei der theoretischen Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ist vorausgesetzt worden, dass die absolute Elastizität der Luft allemal der Dichte proportional ist; man kann aber vielleicht annehmen, dass sie in einem etwas anderem Verhältnisse sich bei verschiedenen Graden des Druckes ändert." Diese Vermutung äußerte La Grange, weil verschiedene Physiker wollten gefunden haben, dass, wenn die Luft stärker als gewöhnlich zusammengedrückt wird, sie sich in einem geringeren Verhälnisse, als dem des Druckes zusammendrücken lasse.

kenswertesten Züge seines Genies. Die Geschwindigkeit, nach diesem Ausdrucke erhalten, ist aber eine viel zu kleine und ungefähr um $\frac{1}{6}$ kleiner als diejenige, welche sich nach den Experimenten ergab, die im Jahre 1738 von den Mitgliedern der französischen Akademie ausgeführt wurden. Newton, der schon diese Differenz nach den Experimenten, die zu seiner Zeit angestellt wurden, erkannt hatte, versuchte jene zu erklären; aber die neueren Entdeckungen über die Natur der atmosphärischen Luft haben diese Erklärung zu nichte gemacht und ebenso alle diejenigen Erklärungen, welche verschiedene andere Mathematiker in Vorschlag gebracht hatten. (Siehe Erkl. 726.) Glücklicherweise beziehen sich diese Entdeckungen auch auf eine Erscheinung, welche mir der wahre Grund des Ueberschusses der beobachteten Geschwindigkeit des Schalles über die berechnete zu sein scheint. Der grösste Teil der Physiker hat denn auch alsbald diesen Grund angenommen. Diese Erscheinung ist die W ä r m e, welche die Luft bei ihrer Kompression freigibt. Sobald man die Temperatur der Luft erhöht, unter der Voraussetzung, dass der D r u c k der letzteren d e r s e l b e bleibt, so wird ein Teil der Wärme, die sie bekommt, nur eben zu dieser Erwärmung verwendet, der andere Teil aber, den sie empfängt und der gebunden bleibt, dient dazu, ihr Volumen zu vergrössern. Der letztere Teil ist auch derjenige, der wieder frei wird, sobald man durch Zusammendrückung die ausgedehnte Luft wieder auf ihr ursprüngliches Volumen zurückführt. Die bei der Näherrückung zweier benachbarten Molekülschichten einer schwingenden Luftsäule frei wer-

Erkl. 727. Wenn wir die Temperatur einer bestimmten Luftmenge von 0°, die in einem vollkommen unausdehnbaren Gefäße enthalten ist, um 1° erhöhen, so nennen wir die dazu notwendige Wärmemenge Cv die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Volumen. Wenn wir aber dieselbe Luftmenge in einem Gefäße, in dem sie sich bei der Erwärmung ausdehnen kann, um 1° erhöhen, so nennen wir die hierzu nötige Wärmemenge Cp, die spezifische Wärme bei konstantem Drucke. Aus der von Newton berechneten und aus der bei den Versuchen beobachteten Geschwindigkeit des Schalles in der Luft, läßt sich das Verhältnis dieser beiden spezifischen Wärmen ableiten. Erheben wir die theoretische Geschwindigkeit V ins Quadrat und ebenso die beobachtete Geschwindigkeit V', so ist, wie Laplace bewiesen hat: $Cp/Cv = V'^2/V^2$. Führen wir die Werte von $V = 280$ m und $V' = 332{,}4$ m in diese Gleichung ein, so finden wir

$$\frac{Cp}{Cv} = \frac{332{,}4^2}{280^2} \text{ oder } \frac{Cp}{Cv} = 1{,}409.$$

So fand Laplace, ohne dass er die spezifische Wärme bei konstantem Volumen oder bei konstantem Drucke kannte, dass das Verhältnis der größeren zur kleineren gleich 1,41 sein mußte. Aus der vorstehenden Formel geht klar hervor, dass die berechnete Geschwindigkeit des Schalles, mit der Quadratwurzel dieses Verhältnisses multipliziert, die beobachtete Geschwindigkeit geben muß. Demnach ist $c = \sqrt{1{,}41} \cdot E/d$ oder $c = 1{,}1874 \cdot 280$ oder $c = 332{,}4$.

Bei der Bestimmung dieses Verhältnisses $k = Cp/Cv$ ist angenommen, dass die bei der Verdichtung entwickelte Wärme in dem verdichteten Teile der Welle bleibt und die Elastizität vermehrt. Würde die Luft die Wärme stark ausstrahlen, so ginge dieselbe zum größten Teile in den abgekühlten und verdünnten Teil der Welle über, es würde ein Wärmeausgleich stattfinden und keine Vermehrung der Schallgeschwindende Wärme erhöht daher deren Temperatur und zerstreut sich nach und nach in die Luft oder die anstossenden Körper; da aber diese Diffusion und Strahlung im Vergleiche zur Geschwindigkeit der Schwingungen sich nur langsam vollzieht, so kann man, ohne merkliche Fehler zu machen, annehmen, dass die Menge der Wärme während der Dauer je einer Schwingung zwischen zwei benachbarten Molekülschichten dieselbe bleibt. So werden denn diese Schichten, wenn sie sich nähern, sich auch stärker abstossen, einmal, weil ihre gegenseitige Abstossung, auch wenn die Temperatur als unveränderlich vorausgesetzt wird (nach Mariotte), im umgekehrten Verhältnisse ihrer Abstände wächst, sodann aber auch, weil die latente (oder gebundene) Wärme, welche (bei der Annäherung) frei wird, die Temperatur der Luftschichten und somit die Spannkraft zwischen ihnen erhöht. Newton hat sein Augenmerk nur auf die erste der beiden Ursachen gerichtet, aber es ist klar, dass auch die zweite die Schallgeschwindigkeit vergrössern muss, weil sie die Abstossung der Luft vermehrt. Indem ich diese Ursache bei der Rechnung berücksichtigte, gelangte ich zu folgendem Gesetze:

„Die wirkliche Geschwindigkeit des Schalles ist gleich dem Produkte aus der Geschwindigkeit, wie sie die Newton'sche Formel liefert und der Quadratwurzel aus dem Verhältnisse der spezifischen Wärme der Luft unter der Voraussetzung, dass dieselbe stets demselben Drucke unterworfen bleibt, aber verschiedene Temperaturen an-

digkeit eintreten. Aus dem durch Laplace berechneten Verhältnisse Cp/Cv hat Robert Mayer das mechanische Aequivalent der Wärme (siehe Erkl. 728) ermittelt, Joule hat dasselbe Aequivalent durch direkte Versuche bestimmt, und durch die Resultate beider wurde bewiesen, dass das von Laplace bestimmte Verhältnis das richtige ist, und dass also die Luft kein merkliches Strahlungsvermögen besitzt.

Erkl. 728. Wie Wärme durch mechanische Arbeit hervorgerufen werden kann, so läßt sich umgekehrt Wärme in mechanische Arbeit verwandeln. Ersteres findet statt, wenn Körper gerieben, gestoßen oder zusammengepreßt werden; letzteres, wenn im Dampfzylinder der Kolben hin und hergeht und dadurch eine Maschine in Bewegung setzt. Zwischen Wärme und mechanischer Arbeit besteht ein ganz bestimmtes Umsetzungsverhältnis, so dass 427 Meterkilogramm Arbeit eine Wärmeeinheit erzeugen, und umgekehrt vermag eine Wärmeeinheit eine mechanische Arbeit von 427 mkg zu leisten. Beide Werte können einander ersetzen, sind einander äquivalent; daher nennt man die Arbeit von 427 mkg das mechanische Aequivalent einer Wärmeeinheit oder kurz das mechanische Wärme-Aequivalent.

nehmen kann, zur spezifischen Wärme der Luft unter der Annahme, dass diese Aenderungen der Temperatur ohne Volumveränderung der Luft erfolgen.“ (Siehe die nebenstehende Erkl. 727.)

Bezeichnet k das Verhältnis dieser spezifischen Wärmen

$$\frac{Cp}{Cv}$$

so ist hiernach die Schallgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{k \cdot E/d}.$$

Frage 800. Es wurde bereits in Erklärung 724 darauf hingewiesen, dass die Temperatur der Luft einen wesentlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Schalles ausübt. Welche Grösse müssen wir desshalb noch in die Rechnung einführen, um eine für alle Temperaturgrade gültige Formel zu erhalten, nach welcher sich die Schallgeschwindigkeit berechnen lässt?

Erkl. 729. Die gasförmigen Körper dehnen sich alle in gleicher Weise aus, und zwar für jeden Grad Temperaturerhöhung um 1/273 oder 0,003665 ihres Volumes. Dieser Bruch, welcher angibt,

Antwort. Da der kubische Ausdehnungskoeffizient für alle Gase 1/273 oder 0,003 665, und zwar für jeden Grad der Temperaturerhöhung gleich viel beträgt (s. Erkl. 729), so haben wir den für die Schallgeschwindigkeit bisher gefundenen Wert

$$c = \sqrt{E/d \cdot k}$$

noch mit der Grösse

$$\sqrt{(1 + 0{,}003\,665\,t)}$$

oder allgemein mit

$$\sqrt{(1 + at)}$$

zu multiplizieren, und erhalten so

$$c = \sqrt{E/d \cdot k\,(1 + at)}.$$

um wieviel sich irgend ein Volumen eines Gases bei einer gewissen Temperatur vergrößert, heißt der **Ausdehnungs-Koeffizient** des Gases. Hat ein Gas bei 0^0 ein Volumen von 1 cbm, so hat dasselbe bei unveränderter Spannung, d. h. wenn es sich, wie die atmosphärische Luft, ungehindert ausdehnen kann, bei 3^0 $1 + 3/273$ bei 7^0 aber $1 + 7/273$ bei t^0 aber $1 + t/273$ cbm Volumen. D. h. bleibt das Gas während seiner Ausdehnung unter demselben Drucke, so nimmt das Volumen V_0 bei t^0 um $V_0 \, . \, at$ zu, und somit ist sein Volumen Vt bei t^0:

$$Vt = V_0 + V_0 \cdot at$$

oder

$$Vt = V_0 \cdot (1 + at),$$

oder für die atmosphärische Luft ist

$$Vt = V_0 \, (1 + 0{,}003665 \; t).$$

Die Versuche, welche man angestellt hat um die Geschwindigkeit des Schalles direkt zu messen, gaben ein mit der Theorie vollkommen übereinstimmendes Resultat.

Beträgt nun die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles bei 0^0 Lufttemperatur wie oben angegeben 332,4 m, so beträgt dieselbe bei t^0 Lufttemperatur

$$c = 332{,}4 \sqrt{1 + 0{,}003665 \; t} \text{ Meter.}$$

Berücksichtigen wir die in Erklärung 723 vorgenommene Rechnung, und bezeichnen wir

mit g die Beschleunigung durch die Schwere (in Berlin = 981,2 cm)

„ H die normale Barometerhöhe = 76 cm

„ σ die Dichte (Masse der Volumeinheit) des Quecksilbers = 13,596

„ s die Dichte der atmosphärischen Luft bei 0^0 unter 76 cm Druck = 0,001 293

„ k das oben bestimmte Verhältnis Cp/Cv

„ a den Ausdehnungskoeffizienten der Luft (oder eines gegebenen Gases)

„ t die Temperatur,

so wird

$$c = \sqrt{E/d \, . \, k \, (1 + at)} \text{ oder } c = \sqrt{\frac{gH\sigma}{s} \, . \, k \, (1 + at)} \text{ oder bei z. B. } 18^0 \, C \text{ ist}$$

$$c = \sqrt{\frac{9{,}812 \, . \, 0{,}76 \, . \, 13{,}596}{0{,}001293} \, . \, 1{,}41 \, (1 + 0{,}003665 \, . \, 18)}$$

$$\text{oder } c = 280 \, . \, 1{,}187 \, . \, \sqrt{1{,}06597} \text{ oder } c = 343{,}2 \text{ m.}$$

---

b) Versuche über die Fortpflanzung des Schalles durch die Luft.

Frage 801. Welches waren die ersten genaueren Versuche über die Fortpflanzung des Schalles in der Luft, und in welcher Weise wurden dieselben ausgeführt?

Erkl. 730. Schon die Alten hatten bemerkt, dass sich der Schall in der Luft verhältnismäßig langsam fortpflanzt. Die ersten numerischen Bestimmungen

Antwort. Die ersten genaueren Versuche waren die berühmten Versuche der Mitglieder der Pariser Akademie, Cassini, Maraldi und Lacaille im Jahre 1738. Als Stationen wählte man die Höhe des Montmartre, die Sternwarte von Paris, die Mühle von Fontenay-aux-Roses, das Schloss Lay, den Turm von Montlhéry und

verdanken wir dem Pater Mersenne; nach der Zeit, welche zwischen der Wahrnehmung von Blitz und Knall einer in der Ferne abgefeuerten Waffe lag, schätzte er die Schallgeschwindigkeit in der Luft auf 448 m in der Sekunde. 1656 erhielten die Physiker Borelli und Viviani in Florenz nach derselben Methode durch sorgfältige Beobachtungen die genauere Zahl von 350 m.

Nachdem Newton die Formel für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles angegeben hatte, folgten die experimentellen Bestimmungen ungemein rasch aufeinander, und es fanden z. B. Boyle 366 m; Cassini, Huyghens, Picard, Römer (1677) 356 m; Flamstead und Halley (1708 und 1709) 348 m; Derham (1708) 348 m.

Die in der nebenstehenden Antwort beschriebenen Untersuchungen fanden ungeheueren Anklang, und überall wurden die Versuche wiederholt. Bianconi wies den Einfluß der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit nach, und Benzenberg zeigte (1809), dass die Geschwindigkeit mit der Temperatur wächst, wie es die Theorie verlangt. Für die Luft beträgt der Geschwindigkeitszuwachs 60 cm pro 1°. Aber alle diese Versuche lösten noch nicht den Widerspruch zwischen der tatsächlichen Geschwindigkeit und dem Werte, der sich aus der Newton'schen Formel ergibt.

bisweilen den Kirchturm von Dammartin. Acht- und zwölfpfündige Kanonen wurden abwechselnd alle halbe Stunden auf den Höhen von Montmartre und Montlhéry gelöst. Die auf den verschiedenen Stationen aufgestellten Beobachter notierten die Zeit, welche zwischen der Wahrnehmung von Blitz und Knall verstrich, und da der Abstand der einzelnen Stationen vorher genau gemessen war, so erhielt man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles durch Division des Abstandes durch die beobachtete Zeit. Diese Beobachtungen wurden längere Zeit (und zwar des Nachts) unter sehr verschiedenen atmosphärischen Verhältnissen angestellt und begannen auf ein vom Observatorium zu Paris (Sternwarte) gegebenes Signal.

Man fand der Theorie gemäss folgende Resultate:

1). Die Fortpflanzungs - Geschwindigkeit ist unabhängig von dem Drucke der Luft.

2). Sie wächst mit der Temperatur der Luft.

3). Sie ist dieselbe in jeder Entfernung von der Schallquelle, d. h. der Schall pflanzt sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit fort.

4). Mit dem Winde pflanzt sich der Schall rascher fort als gegen den Wind, und zwar ist sie im ersten Falle die Summe, im zweiten Falle die Differenz der Geschwindigkeiten des Schalles und des Windes.

5). Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles ist in ruhiger, trockener Luft bei 6° *C* in der Sekunde 337 m, woraus sich für die Geschwindigkeit bei 0° = 332 m ergeben.

Frage 802. Als Laplace den Widerspruch zwischen der theoretisch berechneten und der wirk-

Antwort. Unter Berücksichtigung der Temperatur und des

lichen Geschwindigkeit gelöst hatte (s. Antwort auf Frage 799), hatte er das grösste Interesse daran, seine Theorie mit der Erfahrung vergleichen zu können; er beantragte deshalb beim Bureau des Longitudes die Wiederaufnahme der Messungen mit vollkommeneren Mitteln und unter Berücksichtigung der Temperaturverhältnisse der Atmosphäre, auf welche bei den Versuchen des Jahres 1738 zu wenig Gewicht gelegt worden war. Welche Versuche wurden infolgedessen ausgeführt?

Erkl. 731. Da durch den Einfluß des Windes die Geschwindigkeit des Schalles geändert wird, so ist zur Erzielung genauer Resultate erforderlich, dass man an b e i d e n Enden einer Standlinie den Schall erregt und beobachtet; in der einen Richtung wird dann der Schall so viel beschleunigt, als er in der andern verzögert wird, und das Mittel aus beiden Resultaten ergibt die vom Einflusse des Windes befreite Zahl für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in ruhiger Luft. Van Rees machte darauf aufmerksam, dass man bei gleichzeitig erfolgenden Schüssen, wenn der Wind geht, nur dann das Mittel der auf den beiden Stationen beobachteten Schallgeschwindigkeiten nehmen darf, wenn der Wind genau in der Richtung von Station A nach Station B oder umgekehrt weht, während, wenn er die Verbindungslinie von A nach B kreuzt, kompliziertere Verhältnisse stattfinden, auf die wir hier nicht weiter eingehen wollen.

Erkl. 732. Im Jahre 1823 wurde von den holländischen Physikern Moll, Van Beek und Kuytenbrouwer in der Utrechter Haide zwischen zwei Hügeln, die 17669,3 m von einander entfernt waren, die Geschwindigkeit des Schalles bestimmt. Auf jeder Station hielt ein Offizier die angezündete Lunte über das Zündloch der Kanone, ein anderer faßte

Windes (siehe Erkl. 731) wurde im Jahre 1822 bei Paris zwischen Montlhéry und Villejuif die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles aufs neue bestimmt. Es wurde auf jeder Station von 10 zu 10 Minuten ein von Artilleristen bedienter Sechspfünder gelöst, die so gestellt waren, dass von jedem Orte die Explosion der andern Kanone gesehen wurde. Man war übereingekommen, dass die Kanonenschüsse zu Montlhéry 5 Minuten früher anfangen sollten, als zu Villejuif. Die Beobachter zu Montlhéry waren Humboldt, Gay-Lussac und Bouvard, zu Villejuif Arago, Mathieu und Prony. Die Versuche, am 21. Juni beginnend, fanden während der ruhigsten Nachtstunden statt. Die Kanonenschüsse von Montlhéry wurden zu Villejuif alle gut gehört, zu Montlhéry wurden von den 12, die gelöst wurden, nur 7 wahrgenommen. Dieser unaufgeklärte Umstand gestattete die Korrektur wegen Bewegung der Luft nicht so vollständig, als man wünschte; indessen ergaben die beiderseitigen Beobachtungen nahezu übereinstimmende Resultate. Die Beobachter zu Villejuif nahmen im Mittel 54,84 Sekunden nach dem Lichtblitze den Schall wahr, diejenigen zu Montlhéry nach 54,43 Sekunden. Das Mittel aus beiden Zahlen ist 54,63.

Die Entfernung beider Stationen bestimmte Arago zu 18 622,27 m, die Geschwindigkeit des Schalles ist darnach

$$c = 18\,622{,}27/54{,}63$$

oder $$c = 340{,}8 \text{ m}.$$

Die Temperatur der Luft war bei diesen Beobachtungen 16° C, die Geschwindigkeit bei 0° wird daher

$$c_0 = \frac{340{,}8}{\sqrt{1 + 0{,}003665 \cdot 16}} = 331{,}2 \text{ m}.$$

den Arm des ersteren und beobachtete dabei das Chronometer. Kam der Zeiger auf die verabredete Sekunde, so drückte er den Arm mit der Lunte nieder, und die Kanone entlud sich. Auf der anderen Station drückte ein mit einem Chronometer versehener Beobachter in dem Augenblicke, wo er das Aufblitzen des Pulvers bemerkte, auf eine Feder und setzte dadurch den Zeiger in Bewegung; in dem Augenblicke, wo er den Schall hörte, zog er den Finger zurück, so dass der Zeiger wieder still stand. Um den störenden Einfluß des Windes auszugleichen, wurden die Schüsse auf beiden Stationen möglichst gleichzeitig gelöst. Als Resultat sämtlicher Messungen ergab sich für die Schallgeschwindigkeit in trockener Luft und bei 0° der Wert $c_0 = 332{,}26$ m.

Frage 803. Durch welche Versuche wurde bewiesen, dass die Geschwindigkeit des Schalles unabhängig ist von der Dichtigkeit der Luft, dass sie also dieselbe ist, wenn sich der Schall aufwärts in dünnere Luft oder abwärts in dichtere Luft fortpflanzt?

Erkl. 733. 1871 führte Stone am Kap (Südspitze Afrikas) genauere Versuche aus und erhielt 332,4 m. Auch in den Polargegenden wurde die Schallgeschwindigkeit gemessen, und zwar von Kapitän Parry (1822 und 1824), sowie von Kendall (1825) bei 40° Kälte. Beide fanden die Geschwindigkeit übereinstimmend mit dem theoretischen Werte für diese niedrigen Temperaturen.

Antwort. Dies ist durch die Versuche von Bravais und Martins (1844) bei einem bedeutenden Höhenunterschiede am Faulhorn bestätigt worden. Die eine Station war am Faulhorn, die andere am Brienzer See; ihre schiefe Entfernung betrug 9560 m, der Höhenunterschied 2079 m, so dass die Neigung der vom Schalle durchlaufenen Linie 12° 26′ betrug. Es wurde mit Anwendung wechselseitiger Schüsse auf dem Berge von A. Bravais und Martins, am See von C. Bravais beobachtet. Die beiden ersteren hörten 18, der letztere 14 Schüsse im ganzen an drei Tagen. Die direkt beobachtete Geschwindigkeit des Schalles war aufwärts 337,92 m und abwärts 338,10 m, also im Mittel 338,01 m. Auf 0° und trockene Luft reduziert, wird daraus $c = 332{,}37$ m, eine Zahl, die fast vollkommen mit der von Moll und van Beek erhaltenen übereinstimmt.

Frage 804. Aus welchem Grunde hielt Regnault die oben mitgeteilten Beobachtungsmethoden für mangelhafte, und auf welche Weise suchte er absolut genaue Resultate zu erzielen?

Erkl. 734. Schon Biot hatte einige interessante Beobachtungen über die

Antwort. Regnault war zu der Ueberzeugung gekommen, dass der Beobachter sowohl vom Lichtblitze der Geschütze, als auch von dem Schalle des Geschützdonners immer etwas überrascht werde, dass

a) eine gewisse, wenn auch

Fortpflanzung des Schalles in den Wasserleitungsröhren von Paris gemacht, und Le Roux hatte zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ein Zinkrohr von 72 m Länge benutzt, dass an seinen beiden Enden durch Membranen geschlossen war; diese Membranen wurden durch die Welle, welche infolge der Explosion einer Zündkapsel entstand, in Bewegung gesetzt. Le Roux erhielt für die Schallgeschwindigkeit in trockener, kohlensäurefreier Luft 330,7 m.

Von 1862 bis 1866 führte Regnault eine ganze Reihe von Untersuchungen über die Fortpflanzung des Schalles in Röhren aus, indem er das große Leitungsnetz benutzte, welches die Stadt Paris damals ausführen ließ, um den angrenzenden Gebieten Leuchtgas zuzuführen und das Wasser der Marne und der Dhuis in das Innere der Stadt zu leiten. Außerdem wurde im Collège de France für gewisse Bestimmungen noch eine spezielle Leitung eingerichtet.

sehr kurze Zeit verfliessen muss. zwischen dem wirklichen Eintreffen des Lichtblitzes auf der Netzhaut und dem Augenblicke der seelischen Wahrnehmung, ebenso

b) zwischen dem Anschlage des Donners an das Trommelfell und der eigentlichen seelischen Wahrnehmung des Schalles, sowie dass

c) auch eine gewisse Zeit verfließt zwischen diesen seelischen Momenten und der wirklichen Notierung der Zeiten für den Lichtblitz und den Donner.

Aus diesen Gründen wandte Regnault eine Versuchsmethode an, bei welcher der Augenblick der Schallerregung, sowie der der Ankunft des Schalles am Orte des Beobachters, nicht durch die Tätigkeit des Beobachters selbst, sondern durch selbsttätige Registrierapparate aufgezeichnet wurde. Ausserdem stellte Regnault (zur Vermeidung mancher Schwierigkeiten) die Beobachtungen mit Röhren an.

Frage 805. Welches sind die Grundgedanken der von Regnault getroffenen Versuchsanordnung?

Antwort. Die Grundgedanken bei der Regnault'schen Methode waren folgende:

1). Man erzeugt an einer Station I z. B. durch Abschiessen

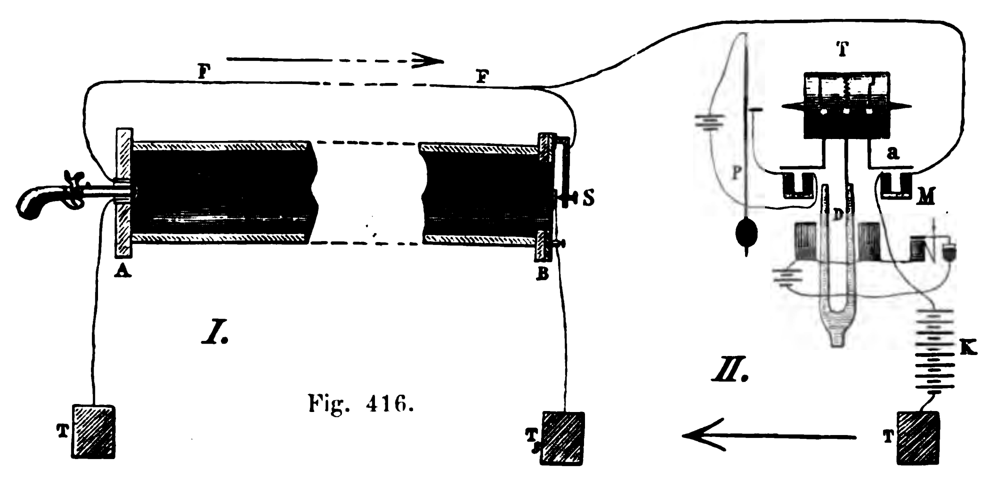


Fig. 416.

Erkl. 735. Die Membran am Röhrenende B trägt in ihrer Mitte ein kleines Platinplättchen, welches durch einen feinen äußerst biegsamen Draht mit der in die Erde versenkten Platte T_8 in Verbindung steht. Unmittelbar vor der Platte befindet sich der Stift s, welcher mit der Leitung F in metallischer Verbindung steht.

Die nach B gelangte Welle wurde dort reflektiert, kam nach A zurück, wurde wiederum reflektiert und kehrte aufs Neue nach B zurück, wo sie wiederum einen Stromschluß bewirkte und so fort. Man konnte also die Fortpflanzung während einer langen Zeit beobachten, die natürlicherweise in Abschnitte von gleicher Dauer zerlegt war.

Als Mittel zur Erzeugung der Schallwellen verwandte Regnault verschiedene Pistolen mit verschieden starken Ladungen, außerdem auch noch die sehr kurze Entladung der Schlagröhren von Kanonen oder die Explosion eines Gemisches aus Sauerstoff und Wasserstoff; ferner ließ er komprimierte Luft einströmen, oder er stieß einen Kolben plötzlich gegen das Ende der Röhre; endlich benutzte er auch die musikalischen Töne eines Instruments oder der menschlichen Stimme..

Regnault's Versuche erstreckten sich auf sieben Röhrenleitungen von ungleichem Durchmesser und ungleicher Länge; nämlich

einer Pistole eine Lufterschütterung, wobei in demselben Momente, wo diese entsteht, durch einen auf die Ladung gesetzten festen Filzpfropfen, ein vor der Mündung ausgespannter Draht zerrissen, und so ein elektrischer Strom unterbrochen wird, der bis zu diesem Momente auf der Station II einen Elektromagneten M in Tätigkeit erhielt, in welcher Tätigkeit ein Hebel a mit dem einem Ende nach dem Elektromagneten hingezogen wurde, und mit dem andern Ende auf eine um eine horizontale Achse sich drehende Schreibtrommel T seine Aufschrift machte. Diese Aufschrift hörte also in dem Augenblicke auf, wo der bei A ausgespannte Draht zerriss, d. h. in dem Momente, als die Verdichtungswelle sich von dem Röhrenende A aus nach dem Röhrenende B hin in Bewegung setzte.

2) Im Momente wo die Verdichtungswelle in B ankommt, trifft sie auf eine in vertikaler Ebene ausgespannte Membran. Diese macht eine Schwingung nach aussen und kommt hierbei in Berührung mit einem besonderen Metallstifte s, wodurch wiederum ein elektrischer Strom geschlossen wird, der denselben Elektromagneten M, welcher im Momente, als die Verdichtung die Platte A verliess, untätig geworden war, momentan wieder in Tätigkeit setzt und so den Hebel veranlaßt, eine zweite Aufschrift zu machen, die aber jetzt, da die Bewegung der Mem-

Röhren des Collège de France	70 m lang,	0,108 m Durchm
Gasröhren an der Militärstrasse	3000 m „	0,108 m „
Gasröhren von Choisy le Roi	3625 m „	0,216 m „
Wasserleitungsröhren an der Militärstrasse	2000 m „	0,300 m „
Wasserleitungsröhren von Villemomble	4900 m „	1,100 m „
Kanalisationsröhren von Sebastopol	960 m „	1,100 m „
Kanalisationsröhren von St. Michel	1420 m „	1,100 m „

Regnault stellte aber auch ausgedehnte Versuche in freier Luft an derart, dass er Kanonenschüsse abfeuerte und deren Erschütterungen ebenfalls auf eine weit davon aufgestellte Membran wirken ließ. So fand er bei einer Entfernung von 1280 m aus 18 Einzelwerten den Mittelwert

$$c = 331,37 \text{ m}$$

und aus 149 Einzelwerten bei einer Distanz von 2445 m

$$c = 330,71 \text{ m}.$$

bran nur eine kurz andauernde ist, auch nur auf eine kurze Strecke hin auf der Schreibtrommel bemerkbar wird. (Siehe Erkl. 735.)

3). Die Strecke zwischen den beiden Stellen der Schreibtrommel, an denen einmal der Schreibstift aufhörte und dann wieder anfing zu schreiben, entspricht der Zeit, welche die Schallwelle gebraucht hat, um von *A* nach *B* zu gelangen. Es muss demnach noch ein Zeitmesser hinzukommen, und Regnault benutzte eine Stimmgabel *D*, welche elektrisch erregt wurde und ihre Schwingungen neben dem Schreibstifte des Elektromagneten auf die Trommel schrieb. Kennt man die Zahl ihrer Schwingungen genau, so braucht man nur die Anzahl der auf der Trommel aufgezeichneten kleinen Wellen zu ermitteln, welche zwischen der ersten und zweiten Marke liegen. Kennt man die Zahl der Gabelschwingungen nicht genau, so muss noch ein Pendel *P* verwendet werden, dass neben der Stimmgabel die Sekunden oder halben Sekunden auf der Trommel markiert.

Frage 806. Zu welchen Hauptresultaten gelangte Regnault durch seine Versuche?

Erkl. 736. Dass die Beschaffenheit der Röhrenwandungen nicht ohne Einfluß auf die fortschreitenden Schallwellen ist, lehrt auch die folgende Erscheinung: Bei den Abzugskanälen von Paris, wo die Arbeiter durch den Ton einer Trompete benachrichtigt werden, beobachtete man, dass die Signale in Gängen, welche mit einer glatten Zementschicht ausgekleidet sind, unverhältnismäßig viel weiter tragen, als in denjenigen, deren Wände aus roh behauenen Steinen bestehen.

Die Entstehungsart der Welle zeigte keinen merklichen Ein-

Antwort. 1) Die Intensität der Schallwelle nimmt beim weiteren Fortschreiten in den Röhren ab, und zwar um so rascher, je enger die Röhren sind.

2). Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines Schalles, falls man dieselbe Intensität der Erregung voraussetzen darf, ist in verschiedenen Röhren nicht dieselbe, sondern verringert sich mit dem Durchmesser der Röhren.

3). Ein Schall von grösserer Intensität pflanzt sich mit einer grösseren mittleren Geschwindigkeit fort, als einer von geringerer.

fluß, vielmehr pflanzte sich die Explosionswelle von Knallgas mit derselben Geschwindigkeit fort, wie die eines Pistolenschusses. (Siehe Anmerkung XXV, Seite 22.)

Erkl. 737. In Bezug auf die musikalischen Töne fand Regnault, dass die scheinbare Fortpflanzungsgeschwindigkeit der hohen Töne wesentlich geringer ist, als die der tiefen. Nach seiner Ansicht kann indessen diese Tatsache auch daher rühren, dass das Trommelfell des Ohres durch die tiefen Töne rascher in Bewegung gesetzt wird, als durch die hohen. v. Helmholtz hat aber in seiner Abhandlung über die Theorie der Luftschwingungen in offenen Röhren für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit U des Schalles in einem Rohre vom Radius R die Formel gegeben

$$U = c\left(1 - \frac{\eta}{2\,R\sqrt{\pi\,N}}\right)$$

worin c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in freier Luft, η den Koeffizienten der inneren Reibung des die Röhre erfüllenden Gases und N die Schwingungszahl des betreffenden Tones bezeichnet. Hieraus würde sich, entgegen Regnaults Erfahrung, ergeben, dass die Geschwindigkeit der tiefen Töne geringer sein müßte, als diejenige der hohen.

4). Die mittlere Geschwindigkeit eines und desselben Schalles in derselben Röhre verringert sich merklich mit der Länge des von ihm zurückgelegten Weges.

5). Die Beschaffenheit der Röhrenwände (ihre Rauhigkeit) übt auf die Intensität des Schalles einen Einfluss aus, der sich jedoch um so mehr abschwächt, je grösser der Durchmesser wird. Diese Einwirkung ist in Leitungen von 1,1 m Durchmesser verschwindend klein, so dass man annehmen darf, es pflanze sich in ihnen der Schall eben so schnell wie in freier Luft fort.

Bei den sehr ausgedehnten Versuchen mit der weitesten Röhre war der Hauptwert, welcher für die Schallgeschwindigkeit ermittelt wurde, und zwar beim Abfeuern eines Pistolenschusses von ½ Gramm Pulverladung, bei vollkommen trockener Luft und 0° Temperatur $c = 330{,}6$ m.

Frage 807. Nach dem oben erwähnten dritten Satze von Regnault ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles abhängig von der Intensität desselben. Welche berechtigten Einwände hat Rink (1873) gegen diesen Satz erhoben?

Erkl. 738. Die Geschwindigkeit in trockener Luft ist geringer, als in feuchter Luft, weil das Vorhandensein von Wasserdampf in der Atmosphäre die Dichtigkeit der letzteren vermindert. Bezeichnet c die Geschwindigkeit in

Antwort. Rink macht darauf aufmerksam, dass bei den Regnault'schen Versuchen durch mehr oder weniger heftige Knalle Explosionswellen erzeugt werden, deren grosse Intensität nicht nur die Luftmasse erschüttert, sondern auch mit grosser Geschwindigkeit fortschleudert, so dass beim ersten Durchlaufen der Röhre eine zu grosse Schallgeschwindigkeit zu beobachten ist, gleichwie bei den Versuchen in freier Luft, bei welchen sich der

feuchter Luft bei der Temperatur t^0, dem Drucke H, und einer Spannkraft des Waserdampfes $= f$, so ist in trockener Luft

$$c_0 = c\sqrt{\frac{1 - 0{,}38\frac{f}{H}}{1 + at}}.$$

Ein Vorteil der Versuche in unterirdischen Röhren ist übrigens eben darin zu finden, dass der Feuchtigkeitsgehalt der Gasmasse, mit welcher man operiert, genau bekannt ist.

Schall in der Richtung des Windes fortpflanzt. Ein solcher, wenn auch schwächerer Einfluss der fortschreitenden Bewegung der Luft ist auch noch bei der ersten Reflexion des Schalles möglich, und desshalb schloss Rink aus seiner Berechnung der Regnaultschen Versuche diese ersten Beobachtungen aus.

Ein weiterer Beweis für die Unabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von seiner Intensität ergibt sich auch daraus, dass bei stärkeren Pulverladungen der Pistole die Geschwindigkeit sich nicht grösser ergibt, trotz der grösseren Intensität.

Frage 808. Zu welchem Resultate gelangte Regnault, als er bei seinen Versuchen von neuem prüfte, ob die Schallgeschwindigkeit (dem Mariotte'schen Gesetze entsprechend) bei allen Drucken der Luft dieselbe sei?

Antwort. Es gelang ihm nicht, einen messbaren Unterschied in der Röhrenleitung in der Schallgeschwindigkeit zu erhalten, trotzdem er in der Röhrenleitung des Collège de France den Druck der eingeschlossenen Luft von 274 mm bis 1267 mm, also bis zum 5fachen des Anfangsdruckes steigerte. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in einem Gase hat also stets denselben Wert, unter welchem Drucke auch das Gas stehen möge. (Siehe Antwort auf Frage 803.)

Frage 809. Endlich hat Regnault den Einfluss der Dichte noch direkt an denjenigen Gasen untersucht, welche man in genügenden Mengen herstellen konnte, um damit die Leitung der Strasse von Ivry (eines 567,5 m langen Teils der Gasleitung der Militärstrasse) oder diejenige des Collège de France von 70,5 m Länge zu füllen. Welches waren die Ergebnisse dieser Versuche?

Erkl. 739. Nach Antwort auf Frage 800 ist der Theorie nach die Geschwin-

Antwort. Sind c und c_1 die resp. Geschwindigkeiten des Schalles im Gase und in der Luft, und bedeutet s die auf die Luft bezogene Dichte des Gases, so müsste nach dem Mariotte'schen Gesetze die Beziehung $c/c_1 = \sqrt{1/s}$ gelten. Die von Regnault erhaltenen Werte von c (für $c_1 = 1$ gesetzt) und die daraus mit der bekannten Dichte der Gase für die einzelnen Gase nach der Gleichung

$$k = (c/c_1)^2 \cdot (s/s_1) \cdot k_1$$

digkeit des Schalles

$$c = \sqrt{\frac{gH\sigma}{s} k (1 + at)},$$

in welcher Gleichung s die Dichtigkeit des Gases bei der Temperatur 0° bedeutet. Hieraus ergibt sich für das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in zwei verschiedenen Gasen

$$c : c_1 = \sqrt{k/s} : \sqrt{k_1/s_1}$$

oder $$c^2 : c_1^2 = k/s : k_1/s_1$$

oder, wenn wir die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft $c_1 = 1$ und die Dichte der Luft $s_1 = 1$ setzen, so ist

$$c = \sqrt{k/sk_1}.$$

Der Wert von c hängt also nur ab von dem Verhältnisse der Werte k und k_1 des Gases und der Luft, sowie von der Dichte des betreffenden Gases.

(siehe Erkl. 739) sich ergebenden Werte von k sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

	c/c_1	$\sqrt{1/s}$	k
Luft	1	1	1,395
Wasserstoff ...	3,801	3,799	1,396
Kohlensäure ...	0,8009	0,8087	1,368
Stickoxydul ...	0,8007	0,8100	1,361
Ammoniak	1,2279	1,3025	1,239

Die Uebereinstimmung zwischen den Werten von c/c_1 und denjenigen von $\sqrt{1/s}$ ist als durchaus genügend zu bezeichnen, da es sehr schwierig ist, so ausgedehnte Röhrenleitungen mit vollständig reinen Gasen zu füllen.

Frage 810. An die Methoden der direkten Bestimmung der Schallgeschwindigkeit, soweit sie bis jetzt besprochen wurden, und wobei grosse Wegstrecken und entsprechende Zeitdifferenzen in Betracht kamen, reihen sich andere, weniger umständliche Methoden, namentlich die zuerst von Bosscha angegebene Methode an, welche man als die Methode der „Koïnzidenzen“ (oder des Zusammentreffens) zu bezeichnen pflegt. Worin besteht der Hauptunterschied dieser von den vorigen Methoden?

Erkl. 740. Im Lehrbuche der Dynamik, Seite 18 ist die Formel $c = s/t$ gegeben, d. h. die Geschwindigkeit eines gleichförmig bewegten Punktes wird gefunden, wenn man den Weg s durch die Sekundenzahl t der Bewegungsdauer dividiert. Wird in dieser Formel die Zeit n mal kleiner, so wird auch die Versuchsstrecke (der Weg) s n mal kleiner. So ist z. B. bei 1/10 oder 1/100 Zeitsekunde auch der Weg des Schalles beziehungsweise nur 0,1 oder 0,01 der früheren Länge.

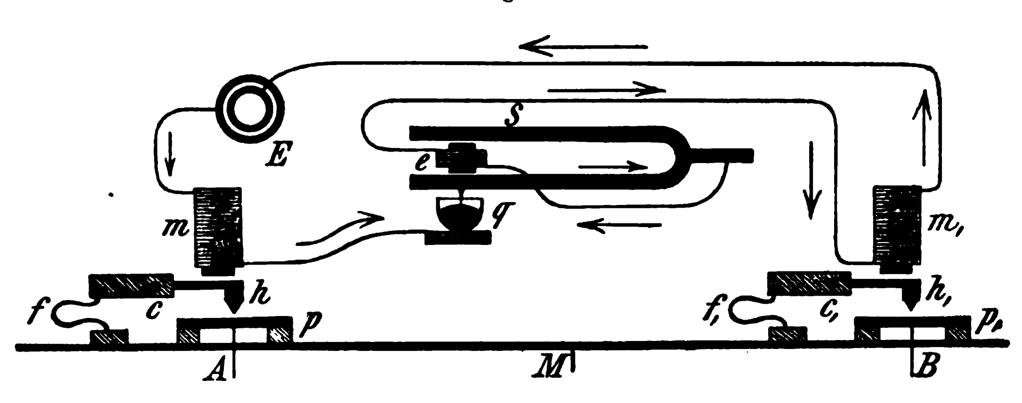
Antwort. Obgleich auch bei dieser Methode schliesslich wieder eine Wegstrecke und eine Zeitdifferenz in Betracht kommen, so unterscheidet sie sich von den früheren Methoden ganz besonders dadurch, dass hierbei so kleine Distanzen benutzt werden können, dass sich die Versuche in einem grösseren Saale, in einem Garten u. dergl. ausführen lassen, wodurch so starke Schallquellen wie Kanonen oder Pistolen überflüssig werden. Dagegen ist aber die Anwendung eines Mittels nötig, vermöge dessen die Zeit, welche der Schall zu seiner freien Weiterleitung braucht, in bequemen Bruchteilen einer Sekunde genau angegeben wird, denn dann kann man den Weg des Schalles für diese Zeit in demselben Verhältnisse kleiner nehmen.

Frage 811. Dieses von J. Bosscha 1854 zuerst in Vorschlag gebrachte Prinzip der Messung der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe der akustischen Koïnzidenzen ist in welcher Weise von R. König in Paris verwirklicht worden?

Antwort. Die aufgestellten Forderungen bezüglich der Schallgeschwindigkeiten bei kurzen Strecken hat R. König in Paris in folgender Weise verwirklicht:

Wir denken uns eine Stimmgabel S (s. Figur 417), welche in einer Sekunde genau 10 doppelte Schwingungen macht, und welche

Fig. 417.



nach dem Prinzipe der Neef'schen Selbstunterbrechung einen galvanischen Strom nach je 0,1 Sekunde immer wieder herstellt. Hat man nun in die Leitung des galvanischen Stromes zwei elektromagnetische Schlagwerke eingeschaltet, so werden diese gleichzeitig ihre hörbaren Zeichen geben, und zwar ebenfalls nach je 0,1 Sekunde, weil sie von der stromherstellenden Stimmgabel abhängig sind. Sobald nämlich die letztere mit ihrem stählernen Stifte in das Quecksilber des Näpfchens q eintaucht, wird die galvanische Kette geschlossen und die Elektromagnete $m\,m_1$ ziehen ihre Anker $h\,h_1$ aus weichem Eisen an. Da aber der galvanische Strom wegen des Zurückschwingens des Stimmgabelstiftes augenblicklich wieder aufhört, so wird auch jederseits der um c resp. c_1 drehbare Anker sogleich wieder

Erkl. 741. Das Auge kann zwei Lichtblitze, welche um 0,05 Sekunden auseinander liegen, nicht mehr getrennt wahrnehmen. Die Lichtempfindungen fließen wegen der Nachwirkung auf der Netzhaut in eine einzige zusammen. Das Ohr hingegen unterscheidet noch deutlich von zwei nebeneinander hängenden Pendeln die Schläge, wenn diese auch nur um 0,01 Sekunde aufeinander folgen. Als die König'schen elektrischen Schlagwerke 3,5 m voneinander entfernt waren, unterschieden die dicht bei dem einen Schlagwerke A stehenden Beobachter noch sehr deutlich das Auseinanderliegen der trockenen Schläge, obschon die von A herrührenden gegen die von B kommenden nur einen Vorsprung von nahezu 0.01 Sekunde hatten. Hieraus geht hervor, dass 10 Schläge in der Sekunde, welche von der Unterbrechungsgabel reguliert wer-

den, zu genauen Resultaten vollkommen genügen und mithin nur eine Standlinie von etwa 35 m nötig ist.

Erkl. 742. J. Bosscha hat das nebenstehend besprochene Verfahren nur angedeutet; er selbst versuchte die Methode der Koïnzidenzen in folgender Weise: Gesetzt, das Pendel einer Uhr B mache 99 Schläge, während jenes einer zweiten dicht daneben befindlichen Uhr A 100 Schläge gibt, und zwar in jeder Sekunde einen Schlag. Beginnen beide Uhren ihre Schläge gleichzeitig, so wird der 100ste Schlag von A mit dem 99sten von B zusammenfallen. Der zweite Schlag des Pendels A wird um 0,01 Sekunde früher erfolgen, als der 2. des Pendels B. Will man jedoch auch diese Schläge gleichzeitig hören, so muß man das Pendel A (wenn z. B. $c = 338$ m beträgt) um 3,38 m von dem dicht beim Pendel B verharrenden Beobachter entfernen. Sollen die Schläge auch nach der zweiten, dritten, 10. Sekunde zusammenfallend gehört werden, so muß das Pendel A um 2. 3,38 m, 3. 3,38 m .... 10. 3,38 m von dem Ohre entfernt werden.

Sind umgekehrt die beiden Pendel 33,8 m voneinander entfernt, und man will durch zweckmäßige Annäherung beider Pendel stets Koïnzidenzen ihrer Schläge hören, so muß man dem bei A befindlichen Beobachter das langsamere Pendel B um 3,38 m nähern, indem dann der Schall gerade um 0,01 Sekunde früher beim Ohre anlangt.

Statt nun die Pendel zu übertragen, ist es einfacher, wenn der Beobachter, vom Mittelpunkt M (Fig. 417) der Strecke ausgehend, sich zwischen beiden Pendeln so hin und her bewegt, dass er stets nach einer bestimmten Zeit Koïnzidenzen erhält. Der Zeitunterschied der

durch die Feder f resp. f_1 von dem Elektromagneten entfernt. Dabei ist die Feder derart gespannt, dass das Zurückführen des Ankers mit grosser Kraft geschieht, so dass ein an dem Anker vorn befindlicher Metallhammer einen kurzen kräftigen Schlag gegen ein Metallplättchen p gibt, welches die obere Wand eines Resonanzkästchens bildet. E bezeichnet die Elektrizitätsquelle. So oft also die galvanische Kette geöffnet wird, hört man von den beiden galvanisch regulierten Zählwerken einen trocknen, kurzen und kräftigen Schlag, und zwar bei der hier gewählten Gabel 10-mal in der Sekunde.

Nehmen wir nun an, dass nach den herrschenden Umständen die Geschwindigkeit des Schalles 338 m beträgt, dann ist die Strecke, welche er in 0,1 Sekunde durchläuft, gleich 33,8 m. Steht nun eine solche Strecke, sowie die oben beschriebene Vorrichtung zur Verfügung, so haben wir das Mittel, die Schallgeschwindigkeit bei kürzeren Strecken zu messen in Händen. So lange beide Schlagwerke dicht nebeneinander stehen, wird man ihr gleichzeitig erfolgendes, kräftiges Ticken auch zusammenfallend (koïnzidierend) hören. Bleibt aber der Beobachter neben dem Schlagwerke A stehen, während das andere (unter Anwendung passender Leitungsdrähte) B immer weiter entfernt wird, so braucht der von letzterem ausgehende Schall eine gewisse, wenn auch kurze Zeit, um zu dem Ohre des Beobachters zu gelangen, er wird also etwas später gehört. Ist endlich das zweite Schlagwerk 33,8 m von dem ersten Schlagwerke und von dem bei diesem befindlichen Beobachter gebracht worden, so fällt der zweite Schlag des entfernten Werkes mit dem

Koïnzidenzen bei den verschiedenen Standpunkten des Beobachters hängt ab von dem gegenseitigen Schwingungsverhältnisse der Pendel, von dem Abstande der letzteren und von der Schallgeschwindigkeit.

ersten Schlage des Werkes A für den dicht dabei stehenden Beobachter zusammen.

Der Beobachter hat also neben dem Schlagwerke A zu bleiben, während das andere Schlagwerk B so lange von dem Beobachter entfernt wird, bis die genaueste Koïnzidenz der Schläge für sein Ohr eintritt. Ist dann z. B. $s = 33{,}8$ m der Abstand beider Schlagwerke und $t = 0{,}1$ Sek. das Zeitintervall, nach welchem die Schläge der Zählwerke aufeinander folgen, so ist nach der Formel

$$c = s/t$$

die gesuchte Geschwindigkeit des Schalles

$$c = 33{,}8/0{,}1$$

oder

$$c = 338 \text{ m.}$$

Frage 812. Eine genaue Reihe von Versuchen hat Akas Szathmari mit Unisinoschlagwerken angestellt, wobei der Unterbrecher anstelle einer Stimmgabel ein Pendel war und als Schlagwerke zwei elektrische Klingeln verwendet wurden. Das Pendel hatte eine Schwingungsdauer von 0,2961 Sekunden. Zu welchem Resultate gelangte der Beobachter bei seinen in einem Garten an einem windstillen Abende angestellten Versuchen?

Antwort. Die beiden Schlagwerke liessen die Zeitdifferenzen bis auf 1/400 Sekunde genau berechnen. Der mittlere Wert der Entfernung der beiden Klingeln betrug 99,25 m, folglich der hieraus abgeleitete Wert c der Schallgeschwindigkeit 99,25/0,2962 oder 335,2 m, welcher reduziert auf 0° Lufttemperatur und auf trockene Luft zu $c = 331{,}57$ m wird.

Erkl. 743. Regnault fand 330,7 und Moll und von Bock 332,26, so dass das aus Koïnzidenzen gefundene Resultat nahezu das Mittel aus den beiden letzten Werten ist.

Anmerkung XXV. Die Geschwindigkeit der Explosionswellen von Flintenschüssen, Zündhütchenknallen und elektrischen Funken in Kanälen wurde (1877 und 78) von Mach u. A. mittelst der Figuren untersucht, welche die Explosionen (nach Antolik) auf berußten Flächen erzeugen; es ergab sich, dass die Geschwindigkeit der Fortpflanzung solcher Explosionen die des Schalles bedeutend übersteigt, und zwar um so mehr, je stärker die Explosion ist, und zwar anfänglich am meisten, während sie bei weiterer Ausbreitung sich bald der des Schalles nähert. Bei genauer Messung fand man, dass die Geschwindigkeit in der nächsten Strecke von 80 mm nicht weniger als 756 m betrug, aber schon in 907 mm Ent-

fernung auf 375 m gesunken war. Auch Jaques (1879) fand, dass die Geschwindigkeit eines Kanonenknalles in der Richtung des Rohres größer, in entgegengesetzter Richtung anfänglich viel kleiner, dann größer und endlich gleich der gewöhnlichen Geschwindigkeit des Schalles in der Luft ist.

Wenn ein starker Stoß sich schneller durch die Luft fortpflanzt als der Schall, so wird ein schwacher Stoß sich langsamer als der Schall fortpflanzen, wie sich mit dem Luftstoßapparate (Fig. 417b) zeigen läßt.

Fig. 417b.



Steht in der Achsenrichtung einige Schritte entfernt eine Kerzenflamme, und schlagen wir gegen die Membran M, so dringt ein Rauchring aus der Oeffnung N, und sobald dieser die Flamme trifft, verlöscht sie durch den Luftstoß. Stellt man an ihre Stelle eine sensitive Flamme (siehe II. Band der Akustik, Seite 364), so zuckt dieselbe durch den Schall des Schlages viel eher, als sie von dem Rauchringe getroffen und durch den Luftstoß völlig zersplittert wird.

Aehnliches scheint auch für feste Körper zu gelten; das schreckliche Erdbeben von Charleston pflanzte (nach Newcomb und Dutton) 1888 seine Erschütterungen um mehr als 5000 m in der Sekunde fort, eine Geschwindigkeit, die den größten Schallgeschwindigkeiten für Eisen und Glas gleichkommt. Dagegen haben (nach Nagués) Dynamitexplosionen in Bergschichten nur 800 bis 1500 m Geschwindigkeit ergeben, wie sie der Schall in denselben Medien mindestens auch hat.

Anmerkung XXVI. Violle und Vautier haben die Fortpflanzung musikalischer Töne in einer langen zylindrischen Röhre von 3 m Durchmesser, die sich in gerader Linie 2922 m erstreckte, und an den beiden Enden durch schallreflektierende Verschlüsse begrenzt war, untersucht, und als erstes Resultat festgestellt, dass die akustischen Eigenschaften auf große Entfernungen erhalten bleiben. Die Tragweite hängt derart von der Tonhöhe ab, dass hohe Töne nicht so weit gehört werden, wie die tiefen. Während C_{-1} (32 Doppelschwingungen) einer 16-füßigen Orgelpfeife noch gehört wird, nachdem es 25 km Weg zurückgelegt hat, ist das des^5 (4400 Doppelschw.) in 1800 m nur noch ein Geräusch ohne musikalischen Charakter, das einige hundert Meter weiter erlischt.

Die Tragweite eines Tones in der Röhre verhält sich umgekehrt wie die Quadratwurzel der Schwingungszahl. Bezeichnet man nämlich die Schwingungszahl, auf die des C_{-1} bezogen mit n, und die Tragweite, geschätzt in Doppellängen der Röhre $c = 5844$ m, mit p, so findet man $p \cdot \sqrt{n}$ konstant. Die Geschwindigkeit der verschiedenen musikalischen Töne, deren Höhe von 1 bis 20 variierte, war die gleiche.

c) Die indirekten Methoden zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit.

Frage 813. Welche Sätze der allgemeinen Wellenlehre (Akustik I. Bd.) kommen bei den indirekten Methoden zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Anwendung?

Antwort. 1) Eine Schwingungsbewegung schreitet innerhalb der Zeit, in welcher eine sogenannte Primitivbewegung stattfindet, um die Strecke l einer Wellenlänge progressiv vorwärts.

Erkl. 744. Die Luft, in welcher sich der Schall verbreitet, macht nicht mehr noch weniger Schwingungen, als der

Körper, welcher den Schall hervorbringt; sobald dieser aufhört zu schwingen, hört auch der Schall auf. Es zeigt sich hierin ein großer Unterschied zwischen den eigentümlichen und den mitgeteilten Schwingungen. Bei den eigentümlichen Schwingungen hat der schwingende Körper in dem Augenblicke, wo er seine natürliche Gestalt oder Ausdehnung wieder erhält, die Hälfte einer Schwingung vollbracht, und also seine größte Geschwindigkeit erhalten, er muß also die erst zur Hälfte vollbrachte Schwingung fortsetzen; wenn aber eine Schwingung vollendet und seine Geschwindigkeit gleich 0 ist, so weicht seine Gestalt oder Ausdehnung am meisten von der natürlichen ab, er kann also auch in dieser Lage nicht bleiben und muß eine neue Schwingung anfangen; es müßten also eigentlich die Schwingungen unaufhörlich fortdauern, wenn solches nicht durch äußern oder innern Widerstand verhindert würde. Hingegen bei den mitgeteilten Schwingungen, oder bei der Verbreitung des Schalles hat jeder Luftteil während seiner größten Verdichtung und Verdünnung auch seine größte Geschwindigkeit, wenn aber eine Schwingung beendigt und also die Geschwindigkeit gleich 0 ist, so hat er seine natürliche Ausdehnung wieder erhalten, es ist also kein Grund vorhanden, warum die Luft noch mehrere Schwingungen machen sollte, außer, wenn sie durch Schwingungen des Körpers, welcher den Schall hervorbringt, von neuem gestoßen wird, oder wenn bei einem Echo oder bei einer Resonanz die der Luft mitgeteilten Schwingungen durch äußere Umstände gewissermaßen in eigentümliche umgeändert werden.

2). Nennt man die Zeit einer Primitivbewegung t, so ist t auch die Zeit, innerhalb welcher die Wellenbewegung um den Weg l fortschreitet; folglich ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung der Quotient $c = l/t$.

3). Da die Schwingungszahl n der Primitivbewegung $1/t$ ist, so ergibt sich für c die wichtige Gleichung $c = n \cdot l$.

Hiernach besteht die indirekte Methode der Schallgeschwindigkeitsbestimmung in folgenden Operationen:

1). Wir erregen in einem Körper einen Ton.

2). Wir bestimmen die Schwingungszahl n des betreffenden Tones.

3). Wir bestimmen die diesem Tone entsprechende Wellenlänge l und

4). Multiplizieren dann n mit l.

Frage 814. Da die Orgelpfeifen gestatten, die Wellenlänge l eines Tones zu ermitteln und die Schwingungszahl n auf anderem Wege zu finden ist, so unternahm Dulong im Jahre 1829 eine Reihe

Antwort. Er versuchte zunächst die Schallgeschwindigkeit in der Luft zu ermitteln, indem er

von Untersuchungen, die hauptsächlich in welchen Operationen bestanden?

Erkl. 745. Diese der freien Luft mitgeteilten Longitudinalschwingungen sind von den eigentümlichen Longitudinalschwingungen der in einer Pfeife eingeschlossenen Luft nicht wesentlich verschieden. Es ist diese Uebereinkunft schon daraus ersichtlich, dass weder die Geschwindigkeit noch die übrige Beschaffenheit des Klanges in einer Pfeife (die Stärke ausgenommen) von der Weite derselben abhängt; wenn also eine unbestimmte Erweiterung der Seitenwände hierin nichts verändert, so können auch die Seitenwände ganz hinweggenommen werden, so dass die übrige freie Luft von allen Seiten den Zutritt hat, ohne dass dadurch eine wesentliche Veränderung bewirkt wird. Es schwingt also eine Strecke von eingeschlossener und von freier Luft in einerlei Geschwindigkeit, so dass durch eine Strecke von freier Luft der Schall in derselben Zeit verbreitet wird, in welcher eine ebenso lange Strecke von Luft, welche sich in einer Pfeife zwischen zwei festen Grenzen befindet, eine Schwingung macht. Was bei der in einer Pfeife enthaltenen Luft die Schwingungsknoten sind, das sind bei diesen der freien Luft mitgeteilten Schwingungen die Stellen, wo die Verdichtung der Luft am größten ist; nur sind beide darin verschieden, dass bei den eigentümlichen Schwingungen der in einer Röhre eingeschlossenen Luftsäule, wegen der Stemmungen eines schwingenden Teils gegen den andern, oder gegen ein verschlossenes Ende die Schwingungsknoten immer an einer Stelle bleiben, dagegen in der freien Luft die Stellen, wo die Verdichtungen am größten sind, immer weiter von dem Körper, welcher den Schall hervorbringt, sich entfernen.

bei verschiedenen offenen Pfeifen die Schwingungszahl n ihres Grundtones und die Länge L der Pfeife bestimmte. Unter der Annahme, dass diese Länge L gleich der halben Wellenlänge des Tones n ist, berechnete er c nach der Formel $c = 2Ln$.

Sodann liess er die Pfeife ihren ersten Oberton angeben und mass mittelst eines Kolbens die Entfernung d der beiden Knoten, die dabei auftreten; diese Entfernung stellte ebenfalls die Grösse $\frac{1}{2} l$ dar. War die Schwingungszahl n' des Tones mit der Sirene gefunden, dann erhielt er wiederum aus der Formel $c = 2dn'$ den Wert für c.

Als Mittel aus einer grossen Zahl von Versuchen ergab sich für die Luft bei 0° die Schallgeschwindigkeit von 333 m.

Um bei derartigen Versuchen zu möglichst genauen Resultaten zu gelangen, benutzt man die früher erhaltenen Formeln, wonach die Schwingungszahl der Töne gedeckter Pfeifen

$$N = \frac{(2n - 1)c}{4(l + x)}$$

und der Töne offener Pfeifen

$$N = \frac{nc}{2(l + x + y)}$$

ist. Siehe II. Band, Seite 473.

Frage 815. Auf welche Weise suchte Wertheim den absoluten Wert der Schallgeschwindigkeit in der Luft zu ermitteln?

Antwort. Wertheim suchte zur Vervollständigung der Arbeiten von Dulong den absoluten Wert der Schallgeschwindigkeit zu ermitteln, indem er bestimmte, um welches Stück die Länge einer den Grundton gebenden Pfeife zu vergrössern ist, damit sie mit der theoretischen Länge übereinstimmt (½l, wenn die Pfeife offen, ¼l, wenn sie geschlossen ist). Die bei den verschiedenen Versuchen erhaltenen Resultate stimmten bis auf 1/100 genau miteinander überein, und das endgültige Resultat war $c = 330{,}9$ m, also wenig grösser als dasjenige, welches Regnault später mit wesentlich weiteren Röhren erhielt.

Erkl. 746. Die Versuche wurden mit vier verschiedenen Pfeifen angestellt und ergaben folgende Mittelwerte:

Pfeife		Durchmesser	Wert
Pfeife aus Messing,	4 cm	Durchmesser	331,89 m
„ „ „	2 „	„	330,11 „
„ „ Glas	2 „	„	329,89 „
„ „ Messing	1 „	„	329,12 „

Wie hieraus zu sehen ist, nimmt die aus der Schwingungszahl und den Pfeifenlängen berechnete Geschwindigkeit erheblich ab mit dem Durchmesser der Pfeifen, während die beiden Pfeifen gleichen Durchmessers auch dieselbe Zahl ergeben.

Frage 816. Die vorerwähnte Messung der Wellenlängen durch Pfeifentöne ist immer etwas unsicher; dagegen hat Kundt (1866 bis 1868) eine Versuchsmethode angegeben, welche die Wellenlängen in Gasen in sehr bequemer Weise direkt zu messen gestattet und daraus die Schallgeschwindigkeit aufs genaueste berechnen lässt. Welches Prinzip liegt der Kundt'schen Methode zu grunde?

Antwort. Klemmt man eine Glasröhre von 1 bis 2 m Länge und 2 bis 4 cm Durchmesser in der Mitte fest (siehe Figur 418) und streicht sie mit einem feuchten wollenen Lappen von der Mitte nach dem Ende, so gerät sie in longitudinale Schwingungen. Obgleich nur die e i n e Hälfte der Röhre gerieben wird, schwingen b e i d e Hälften genau in gleicher Weise; beide Enden weichen zugleich nach aussen und nach innen aus (wie wir bereits im II. Bande der Akustik erfahren haben). Schliessen wir die Enden der Röhre durch Korke, so werden diese durch die sie umklammernde Glaswand gezwungen, der hin- und hergehenden Bewegung zu folgen; sie schwingen mit. Die nach innen gerichteten Endflächen der beiden

Erkl. 747. K u n d t hat hier denselben Versuch mit einer Luftsäule ausgeführt, den M e l d e (siehe Seite 38 im II. Bande der Akustik) mit einem schwingenden Faden ausführte, welcher sich, dem Stimmgabeltone entsprechend, in eine Reihe schwingender Abteilungen teilte. Die Entfernung von einem Knoten zum nächsten ist gleich der halben

Wellenlänge des Tones der schwingenden Luftsäule; zugleich ist die halbe Wellenlänge dieses Tones im Glase gleich der Röhrenlänge; und da die Wellenlänge bei derselben Schwingungsdauer der Fortpflanzungsgeschwindigkeit proportional ist, so verhält sich die Geschwindigkeit im Glase zu derjenigen in der Luft wie die Röhrenlänge zu dem durch das Pulver markierten Abstande zweier aufeinanderfolgender Knoten.

Die Länge dieser stehenden Wellen hängt lediglich von der Höhe des Longitudinaltones und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen in dem die Glasröhre erfüllenden Gase ab, oder wenn wir dieselbe Röhre der Reihe nach mit verschiedenen Gasen füllen, so ist die Länge der Wellen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den verschiedenen Gasen direkt proportional.

Kundts Untersuchungen gehören zu den bedeutendsten der neueren Akustik. Die erste Abhandlung erschien 1865 in „Poggendorffs Annalen“, Bd. 127 und Bd. 135.

Fig. 418.

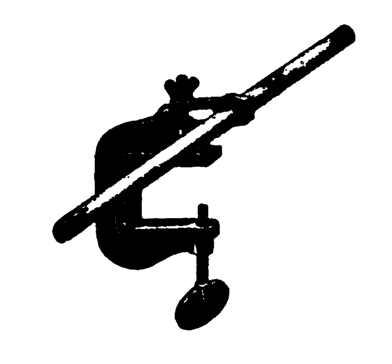


Fig. 419.



Korke erregen dann bei jeder Schwingung die in der Röhre befindliche Luft. Wir haben es daher mit zwei Schwingungsquellen zu tun, welche sich stets in entgegengesetzter Phase befinden, und welche jeden Augenblick der Luft, mit der sie in Berührung stehen, entgegengesetzt gerichtete Impulse erteilen. Die Schwingungen der Korke übertragen sich also auf die Luft in der Röhre und pflanzen sich in derselben fort; die einander entgegenlaufenden Wellen erregen bei entsprechender Länge der Röhre stehende Luftwellen.

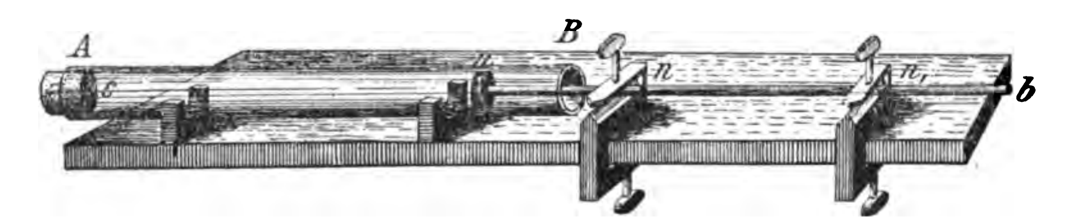
Wenn die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft, gleich der Geschwindigkeit des Schalles im Glase wäre, so würde die Röhrenluft in gleichem Rhythmus (oder Zeitmass) mit der Röhrenwand schwingen. Da aber die Schallgeschwindigkeit in der Luft eine viel geringere ist, als die im Glase, so muss, wenn die Schwingungen beider übereinstimmen sollen, die Luftsäule sich in Abschnitte von passender Länge teilen. Kundt hat nun gezeigt, wie diese Abschnitte gut sichtbar zu machen sind. Man bringt in die vollkommen trockene Röhre recht trockenen Staub von Lycopodium (Hexenmehl) oder amorpher Kieselsäure oder besser Korkpulver, aber nur eben so viel, dass durch Schütteln die ganze innere Röhrenwand bestäubt wird. Wird nun die wieder verschlossene Röhre in ihrer Mitte in einem Schraubstock befestigt und die eine ihrer Hälften mit einem nassen Tuche der Länge nach rasch gerieben, so bildet das Mehl auf dem Boden der Röhre sofort Figuren, aus denen man die Teilung der Luftsäule in mehrere Wellen erkennen kann, denn ein Kranz von Mehl umgibt jeden Knoten, während sich das Mehl zwischen den

Knoten längs der Schwingungsbäuche in Querstreifen anordnet, denn hier ist die Luftbewegung und somit auch die Bewegung des Pulvers am heftigsten.

Frage 817. Da mit den Längsschwingungen (wie Savart und Seebeck gezeigt haben) oft Querschwingungen auftreten, durch welche die Reinheit der Staubfiguren gestört wird, so hat Kundt schliesslich welche Versuchsanordnung getroffen, um den Einfluss solcher Quer-Schwingungen zu vermeiden?

Antwort. Kundt hat seinem Fundamentalversuche die folgende Form gegeben, welche durch die Figur 420 veranschaulicht wird. *A B* stellt eine 1,5 bis 2 m lange Glasröhre von etwa 3 cm innerer Weite vor, die auf zwei Holzklötzen mit halbkreisförmigen Ausschnitten gelagert ist; ebenso ist

Fig. 420.



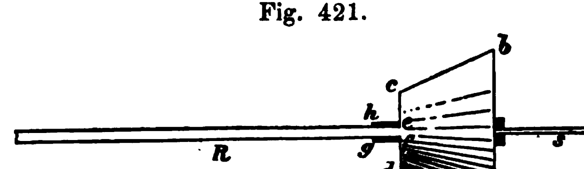
a b eine zweite Glasröhre, oder ein Glasstab (unter Umständen auch eine Metallröhre oder ein Metallstab) von ebensolcher Länge wie *A B*, und etwa 15 mm Dicke. Diese Röhre *a b* ist bei $n\,n_1$ durch zwei Klemmen an einer Tischplatte in horizontaler Lage festgehalten. Das Ende bei *a* ragt ein Stück in das Innere der weiten Röhre *A B* hinein und trägt bei *a* eine Scheibe oder einen Korkstopfen, der mit Spielraum gestattet, dass, wenn *a b* festliegt, *A B* noch hin- und hergeschoben, oder um die Längsachse gedreht werden kann, d. h., die Scheibe *a* darf die Wand der weiten Glasröhre nirgends berühren, aber auch nicht zu viel Zwischenraum lassen, dagegen ist das Ende *A* durch einen Stopfen c fest verschlossen. Beide Röhren

Erkl. 748. Bringt man die Schwingungsröhre durch Streichen ihres mittleren Teiles in der Richtung von *n* nach n_1 zum Schwingen, so sind es die Stöße des freien Endes *a* gegen die eingeschlossene Luft, welche die Luft in Schwingungen versetzen; die Schwingungen werden bei *c* reflektiert, so dass auch hier stehende Wellen sich ausbilden, in deren Knoten der Staub sich ansammelt. Bei dieser Art der Erzeugung der Luftschwingungen werden die Knotenlinien nicht durch die Savart'schen Linien gestört, wie es bei der ersten Art der Erregung möglich ist, bei der die Röhre selbst schwingt.

Erkl. 749. Da ein longitudinal schwingender Stab nur hohe Töne hervorbringen kann, so sind die Wellen in dem Luftrohre *A B* verhältnismäßig kurz. Um dieselben Staubfiguren

durch Schwingungen von größerer Periode zu erregen, wandte (1870) Melde folgendes Verfahren an: Die Wellenröhre *R* (Fig. 421) wird mit einem Ende in die Deckfläche *c d* einer Blechdose von der Form eines abgestumpften Kegels *a b c d* luftdicht schließend eingelassen. Auf der Grundfläche der Dose bringt man ein Streichstäbchen *s* an, durch welches man die Bodenfläche *a b* in Transversalschwingungen versetzen kann, welche sofort in *R*, wenn hier Korkfeilicht verteilt ist, die Staubfiguren erzeugen. Eine von Melde benutzte Röhre *R* war 1,8 m lang bei 17 mm innerem Durchmesser. Wegen der tieferen Töne der Blechplatte ist man in leichter Weise imstande, die Anzahl *n* der Schwingungen

Fig. 421.



zu bestimmen, so dass in diesem Falle die Gleichung c = *n* . *l* direkt zur Anwendung kommen darf. Weiteren Vorteil gewährt der Umstand, dass die Platte *a b* neben ihrem Grundtone leicht noch einen Oberton hören läßt und man sofort zeigen kann, wie bei höheren Tönen die Wellenlänge *l* kleiner wird. Ein Versuch mit obiger Glasröhre ergab z. B. folgendes: Der Grundton der Platte zeigte *n* = 328 Schwingungen, und gingen zwei Halbwellen im Rohre *R* auf 1019 mm. Bei einem Obertone war die Schwingungszahl *n* = 528 und gingen vier Halbwellen auf eine Strecke von 1266 mm. Demgemäß waren die entsprechenden Wellenlängen *l* gleich 1019 mm oder 1,019 m und 633 mm oder 0,633 m, und demnach die beiden Werte der Schallgeschwindigkeit *c* im ersten Falle 328 . 1,019 oder 334,232 m und im zweiten Falle 528 . 0,633 oder 334,224 m.

sind möglichst so gelagert, dass ihre Längsachsen in eine und dieselbe gerade Linie fallen.

Nachdem diese Anordnung getroffen ist, nimmt man *A B* weg und bringt in die vollkommen trockene Röhre vollkommen trokkenes Korkfeilicht oder Lycopodium und verteilt dasselbe im Innern möglichst gleichmässig. Dann bringt man *A B* wieder in die Lage der Figur und streicht nun die Glasröhre *a b* zwischen den Knotenpunkten $n\,n_1$ mit einem nassen Tuchlappen, damit sie ihren zweiten Longitudinalton laut und rein hören lässt. Zu diesem Zwecke ist es notwendig, dass *a n* gleich $b\,n_1$ gleich ¼ *a b*, also die Strecke $n\,n_1$ gleich ½ der Röhrenlänge *a b* ist. Wird die engere oder die Schwingungsröhre mehr oder weniger tief in die weitere, die Wellenröhre, eingeführt, so lässt sich der Abstand zwischen dem geschlossenen Ende dieser letzteren und der äusseren Fläche des Korkes (*a*) der Schwingungsröhre so regulieren, dass diese Länge genau eine ganze Anzahl halber Wellenlängen umfasst. In solchem Falle sind die stehenden Wellen von grösster Regelmässigkeit, was man daraus erkennt, dass sich das Pulver in den Knoten dichter zusammendrängt. Die Längen der Halbwellen lassen sich daher auf das genaueste bestimmen.

Frage 818. Wie lässt sich mittelst der Kundt'schen Methode die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft leicht ermitteln?

Erkl. 750. Umgekehrt kann man aus der bekannten Schallgeschwindigkeit in der Luft, verglichen mit der Länge einer Staubfigur, sofort die Zahl der Schwingungen ableiten, die in einer Sekunde von der Röhre ausgeführt werden. Ist z. B. jede Staubfigur 7,5 cm lang und die Schallgeschwindigkeit der Luft bei der Ausführung des Versuches 342 m, so beträgt, da die Tonwelle 2 . 7,5 oder 15 cm lang ist, die Schwingungszahl der Glasröhre

34200/15 oder 2280.

Antwort. Beträgt z. B. der Abstand zweier Knoten *NN* (Fig. 419) 80 mm, so ist die Länge einer ganzen Welle gleich 160 mm. Haben wir nun mit Hilfe einer Sirene oder eines Monochords die Schwingungszahl des Longitudinaltones der Streichröhre zu z. B. 2125 ermittelt, dann ist hiernach die Geschwindigkeit des Schalles $c =$ 2125 . 0,16 m oder 340 m.

Frage 819. In welcher Weise lässt sich ferner mittelst dieser Methode das Verhältnis der Schallgeschwindigkeit im Materiale des schwingenden Stabes zu der in der Luft finden?

Erkl. 751. Anstatt einer Schwingungsröhre aus Glas können wir einen Stab von einer anderen festen Substanz, z. B. von Holz oder Metall anwenden und so das Verhältnis ihrer Schallgeschwindigkeit zu der der Luft bestimmen. Hat z. B. eine Messingröhre von 1985 mm Länge, als Schwingungsröhre mit einem eingeharzten Tuche gerieben in dem 1985 mm langen Wellenrohre Staubabteilungen von 92,3 mm Länge erzeugt, so ist, (da die Messingröhre die Oktave ihres Grundtones gibt, dessen Wellenlänge gleich der halben Länge der Röhre, also 992,5 mm ist), 992,5/92,3 gleich 10,75 die Zahl, welche uns sagt, dass der Schall in Messing sich 10¾ mal so schnell fortpflanzt, als in der Luft; oder die Schallgeschwindigkeit ist im Messing 3676,5, wenn sie in der Luft 342 m beträgt.

Antwort. Ist beispielsweise die Länge der Schwingungsröhre *ab* 1495 mm und kommen auf eine 996 mm lange Strecke des Wellenrohres 20 halbe Wellen, dann ist die Wellenlänge $l = 99{,}6$ mm und das Geschwindigkeitsverhältnis 1495/99,6 oder 15,01, d. h. der Schall pflanzt sich im Glase 15,01 mal so gut fort wie in der Luft. Die Länge der Schwingungsröhre (oder des Schwingungsstabes), verglichen mit der Länge einer auf mm genau gemessenen Staubfigur, ergibt sofort das Verhältnis zwischen der Schallgeschwindigkeit in dem Stabe und in der Luft.

Frage 820. Inwiefern kann die Kundt'sche Methode auch mit Vorteil benutzt werden, um das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in zwei festen Körpern, z. B. in Glas und Messing zu finden?

Erkl. 752. Experimentieren wir in gleicher Weise mit einer Eisenröhre oder mit einem gleich langen Eichenholzstabe, und finden wir im ersten Falle die Länge der Staubabteilungen 66,5 mm, im letzteren Falle aber 73,1 mm, so ist die Schallgeschwindigkeit im Eisen 73,1/66,5 oder 1,099 mal so groß als im Eichenholze, oder wenn dieselbe im Eichenholze 4672 m beträgt, so beträgt sie im Eisen 1,099 . 4672 = 5136 m.

Antwort. Ersetzen wir den Glasstab durch einen Messingstab von 1495 mm Länge, den wir durch Reiben mittelst eines Kolophoniumlappens zum Tönen bringen, so erhalten wir 14 Staubfiguren auf 994 mm Länge, d. h. 14 halbe Wellen sind 994 mm, also eine Welle 994/7 = 142 mm lang. Vergleichen wir diese Wellenlänge mit der oben bei Anwendung eines Glasstabes erhaltenen, (s. Antw. auf Frage 819) so ergibt sich 142/99,6 gleich 1,42 d. h. das Glas leitet den Schall 1,42 mal so gut fort wie Messing.

Frage 821. Ganz vorzüglich ist die Kundt'sche Methode geeignet zur Vergleichung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles *in verschiedenen Gasen.* Wie gestaltet sich das Verfahren in diesem Falle?

Erkl. 753. Wüllner bestimmte auf die nebenstehend beschriebene Weise nicht allein die relative Geschwindigkeit des Schalles in den verschiedenen Gasen, sondern auch die absoluten Geschwindigkeiten vermittelst der Schwingungszahlen des erregenden Stabes; hierbei berücksichtigte er auch noch den Einfluß des Röhrendurchmessers mit Hilfe der Formel, die wir in Erkl. 737 mitgeteilt haben. Die nachstehende Tabelle enthält in Kolumne I die Namen der Gase, in II die Dichtigkeiten derselben, in III, IV, V die Geschwindigkeiten der Gase bei 0° nach Dulong, Regnault und Wüllner, bezogen auf Luft

Antwort. Wird die bei den vorigen Versuchen benutzte Wellenröhre mit einem beliebigen Gase gefüllt, dann wird die Zahl der sich bildenden Staubabteilungen, je nach der Leitungsfähigkeit der betreffenden Luftart, eine verschiedene sein. Ist z. B. die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in dem betreffenden Gase doppelt so gross als in der Luft, womit die Röhre zuerst gefüllt war, so werden auch die halben Wellenlängen doppelt so gross sein, und daher wird die Anzahl der Schwingungsknoten und Bäuche halb so groß ausfallen, d. h. die entsprechenden Entfernungen der Staubhäufchen sind in den beiden Fällen den Geschwindigkeiten genau proportional.

Füllen wir z. B. die Wellenröhre vollständig mit Leuchtgas an und behalten die Messingröhre (siehe Antwort auf die vorige Frage) bei, so zeigen sich auf 888 mm Länge im Wellenrohre 8 Halbwellen, und demnach beträgt die Wellenlänge im Leuchtgase 888/4 = 222 mm, in der Luft war sie da-

gleich 1, in VI die von Wüllner bestimmten Werte der Geschwindigkeiten in Metern bei 0°.

Name der Gase	Dichtigkeit	Geschwindigkeit des Schalles nach			c_0 Wüllner
		Dulong	Regnault	Wüllner	
Luft	1	1	1	1	331,898
Sauerstoff	1,1056	0,9524	—	—	—
Wasserstoff . . .	0,06926	3,8123	3,801	—	—
Kohlenoxyd . . .	0,9678	1,0132	—	1,0158	337,129
Kohlensäure . . .	1,5290	0,7856	0,8009	0,7812	259,383
Stickoxydul . . .	1,527	0,7865	0,8007	0,7823	259,636
Ammoniak. . . .	0.5967	—	1,2279	1,2534	415,990
Äthylen	0,9784	—	—	0,9518	315,90

Die Annalen der Physik von 1902, Band VII, geben die Schallgeschwindigkeiten in folgenden Dämpfen bei den nebenstehenden Temperaturen:

	t^0	c
Äther	99,7	212,6 m
Methylalkohol . . .	99,7	350,3 "
Äthylalkohol	99,8	272,8 "
Schwefelkohlenstoff.	99,7	223,2 "
Benzol	99,7	205,0 "
Chloroform	99,8	171,4 "
Jod	185,5	140,0 "

gegen 142 mm. Demnach verhält sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Leuchtgase zu der in der Luft, wie 222 : 142 oder das Leuchtgas leitet den Schall 222/142 = 1,563 mal so gut fort als die atmosphärische Luft, und wenn in der Luft der Schall in der Sekunde 340 m forteilt, so durchläuft er in derselben Zeit im Leuchtgase 531,5 m.

Frage 822. Welches Verfahren schlug Dulong zu demselben Zwecke ein?

Erkl. 754. Wir kommen auf sehr einfache Weise zu denselben Resultaten, wenn wir als Schwingungsröhre unmittelbar die Röhre benutzen, welche das Gas enthält. Bei dieser Anordnung wird die mit Gas gefüllte und etwas Staub enthaltende Röhre an beiden Enden zugeschmolzen. In solcher Form können wir die Röhren beliebig lange aufbewahren, und sie sind stets zum Gebrauche fertig; durch Schütteln wird ihre innere Fläche dünn mit Staub überzogen. Es genügt dann, sie in der Mitte festzuhalten und mit einem feuchten Tuche zu reiben,

Antwort. Dulong bediente sich zu demselben Zwecke der Töne von Orgelpfeifen; er legte die Pfeifen horizontal in einen vollständig mit dem gut ausgetrockneten Gase gefüllten Holzkasten. Ein Gasometer mit demselben Gase angefüllt, trieb dasselbe in den Fuß der Pfeife, während durch eine mit dem Beginne des Gasstromes frei werdende Oeffnung in der Kastenwand, ein gleiches Quantum Gas wieder abfloss. Ist nun bei einer und derselben Pfeife N die Schwingungszahl des Tones in dem einen, N' diejenige in einem andern Gase, so ist $c/c' = N/N'$, woraus, wenn wir die Geschwindigkeit c' z. B. in der Luft als an-

um die Staubfiguren auftreten zu lassen und aus deren Länge die Schallgeschwindigkeit des Gases sofort zu ersehen.

derweitig bestimmt annehmen, die Geschwindigkeit c des Schalles in den andern Gasen leicht zu ermitteln ist.

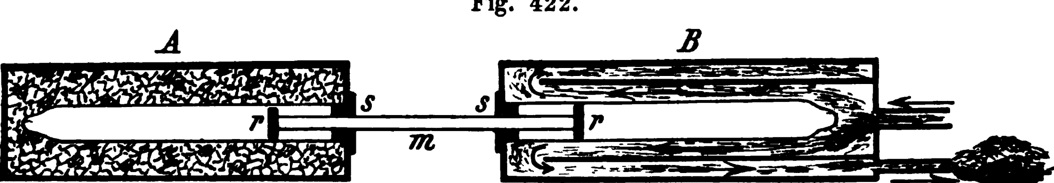
Frage 823. Von welchem Einflusse ist die Temperatur auf die Wellenlänge und somit auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, und wie lässt sich dieser Einfluss nachweisen?

Antwort. Wenn wir die Wellenröhre, in welcher die Länge der Staubfiguren gemessen wird, dadurch verschiedenen Temperaturen aussetzen, dass wir sie einmal in schmelzendes Eis, ein anderes Mal in siedendes Wasser stellen, so werden wir beobachten, dass die Staubfiguren, und somit auch die halben Wellenlängen in der kalten Röhre kürzer sind, als in der warmen Röhre, dass sich also der Schall in der warmen Luft schneller fortpflanzt als in der kalten. So fand Kundt bei seinen Versuchen (siehe nebenstehende Erklärung), dass die halbe Wellenlänge in der eiskalten Röhre im Mittel 30,644 mm, in der warmen Röhre bei einer mittleren Temperatur von 100,13° aber 35,872 mm betrug. Danach verhält sich die Fortpfanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft von 0° zu derselben in der Luft bei 100° wie 30,644 : 35,872 oder wie 1 : 1,171. Setzen wir also die Geschwindigkeit des Schalles bei 0° gleich rund 332 m, so ist dieselbe bei 100° gleich 1,171 . 332 m oder gleich 388 m. Kundt fand bei seinen Versuchen der Reihe nach 389,21 m; 388,84 m; 389,15 m; 388,47 m; 389,02 m; 389,64 m; 388,60 m; im Mittel also

Erkl. 755. Um bei seinen Versuchen dieselbe Schwingungsdauer in kalter und warmer Luft zu erreichen, traf Kundt die folgende, in Figur 422 dargestellte Versuchsanordnung. Jedes der beiden Enden rr einer Schwingungsröhre war bis zu $1/4$ der Röhrenlänge in eine Wellenröhre eingeführt und mit Stopfen ss darin befestigt. Die eine der beiden Wellenröhren war in einem Kasten A mit schmelzendem Eise angebracht, die andere hingegen in einem Kasten B mit Dampf von siedendem Wasser umgeben. Die Schwingungsröhre wurde in der Mitte m durch Streichen in Vibrationen versetzt. Da es nun die Schwingungen derselben Röhre sind, welche in den beiden ungleich erwärmten Wellenröhren die Luft in Schwingungen bringen, so ist die Verschiedenheit der Staubfiguren, d. h. der Abstände ihrer Schwingungsknoten, nur dem Unterschiede der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der ungleich erwärmten Luft zuzuschreiben.

Diese Versuchsanordnung ist auch vorzüglich geeignet, um die Fortpflanzungsgeschwindig-

Fig. 422.



keiten in zwei Gasen miteinander zu vergleichen. Zu diesem Zwecke versieht man die Wellenröhren mit Zuleitungsröhren und Hähnen.

Erkl. 756. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Schalles wurden besonders deshalb möglichst genau gemessen, um daraus das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Drucke zu derjenigen bei konstantem Volumen Cp/Cv zu ermitteln, welche Größe k (siehe Antwort auf Frage 799) in der Formel für die Schallgeschwindigkeit vorkommt, und welches Verhältnis für die mechanische Wärmetheorie von großer Bedeutung ist.

388,99 m. Hierdurch fand zugleich das Gesetz seine Bestätigung, nach welchem die Geschwindigkeit sich proportional der Grösse $\sqrt{1+at}$ ändert (siehe Antwort auf Frage 800), so daß

$$30,644 : 35,872 = 1 : \sqrt{1 + 100,13a}$$

ist. Berechnen wir aus dieser Proportion den Ausdehnungskoeffizienten (a) für die Luft, so ergibt sich $a = 0,003\,662$, ein Wert, welcher mit dem von Regnault gefundenen (0,003 665) übereinstimmt.

Frage 824. Kundt fand bei seinen Versuchen welchen (schon von Wertheim beobachteten) Einfluss des Röhrendurchmessers auf die Schallgeschwindigkeit?

Antwort. Die Schallgeschwindigkeit in einer engen Röhre nimmt ab, wenn der Durchmesser des Rohres abnimmt; ist jedoch die Weite größer, als ungefähr ¼ der Wellenlänge, so ist der Unterschied nicht merklich. Diese Abnahme ist für tiefe Töne (also bei größerer Wellenlänge) beträchtlicher als für die hohen Töne (mit kleinerer Wellenlänge). Die Beweise für diese Schlüsse ergeben sich aus der nachstehenden Tabelle von Kundt.

Erkl. 757.

Durchmesser der Röhren	Geschwindigkeit des Schalles für Töne mit Wellenlängen von		
	180mm	90mm	60mm
mm			
55,0	1,01010	1,00885	1,00584
26,0	1,00908	1,00842	1,00781
13,0	1,00000	1,00000	1,00000
6,5	0,98031	0,99170	0,99176
3,5	0,92628	0,96666	—

Frage 825. Von welchem Einflusse ist die Beschaffenheit der Röhrenwand auf die Geschwindigkeit des Schalles?

Antwort. Die Geschwindigkeit ist bei rauhen Wänden kleiner als bei glatten Wänden

a) infolge der Reibung der schwingenden Gasteile an den Röhrenwänden

b) infolge der Verkleinerung des Koeffizienten k (Erkl. 756), weil ein Temperaturausgleich zwischen Gas und Röhrenwandung stattfindet.

Erkl. 758. Die Geschwindigkeitsabnahme ist für enge Röhren und tiefe Töne größer, da hier die Wandfläche im Verhältnis zur schwingenden Luftsäule größer ist. Je langsamer ferner die Schwingungen sind, um so größer ist der Wärmeaustausch mit den Röhrenwänden, da die mit Erwärmung verbundenen Verdichtungen sowie die mit Abkühlung verbundenen Verdünnungen dann um so länger dauern.

Frage 826. Zu welchen Ergebnissen kamen auch Seebeck (1871) und Kayser (1878) durch entsprechende Versuche?

Antwort. Auch Seebeck's Versuche ergaben, dass hohe Töne sich in Röhren schneller fortpflanzen als tiefe; außerdem fand Seebeck, dass in Röhren überhaupt die Geschwindigkeit um einige Meter kleiner wird, und der Verlust dem Durchmesser umgekehrt proportional und von der Beschaffenheit der inneren Oberfläche abhängig ist. Auch die Versuche von Kayser ergaben, dass die Schallgeschwindigkeit in Röhren kleiner ist als in der Luft, und dass die Verzögerung umgekehrt proportional ist dem Röhrendurchmesser und der Schwingungszahl.

Erkl. 759. Die von Seebeck gewählte Versuchsanordnung zeigt Figur 423. In einem horizontal liegenden Glasrohre, an welchem bei b ein kleines Rohr senkrecht zur Längsachse angeschmolzen ist, kann ein dicht schließender Stempel k hin -und herbewegt werden. An dem Rohre ist eine Skala angebracht, deren Nullpunkt bei b liegt. Von dem kleinen Rohre geht ein Kautschukschlauch aus, dessen Ende in das eine Ohr gesteckt wird, während das andere Ohr durch einen Wattepfropfen geschlossen wird. Erzeugt man nun in dem Rohre stehende Wellen, so ist nichts zu hören, wenn bei

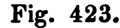
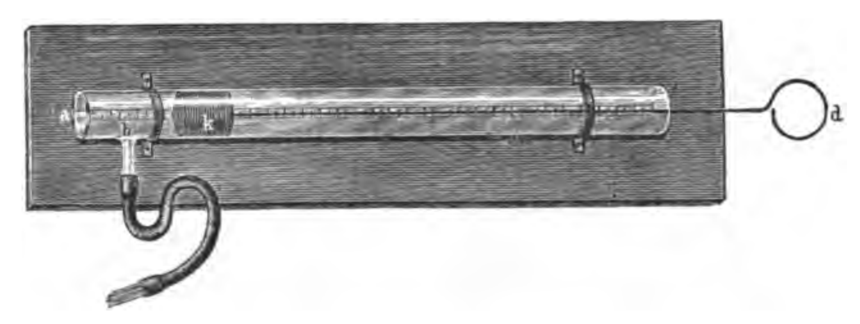


Fig. 423.



b ein Schwingungsmaximum ist, denn die Luft schwingt dann nur hin und her, ohne Verdichtung und Verdünnung. Hält man deshalb eine tönende Stimmgabel unmittelbar an das Ende *a* und verschiebt den Stempel *k* so lange, bis das Ohr keinen Ton mehr wahrnimmt, so befindet sich bei *b* ein Schwingungsmaximum, und da sich an dem Stempel *k* immer ein Knoten befindet, so ist der Abstand der Stempelfläche von *b* $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge des Tones im Innern der Röhre. Das Vierfache dieses Abstandes, multipliziert mit der Schwingungszahl des Tones, gibt somit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen im Rohre. Die auf diese Weise zu erreichende Genauigkeit ist eine sehr beträchtliche.

In engen Röhren vermindert sich die Geschwindigkeit auch durch das in die Röhren eingestreute Pulver und zwar infolge der durch dasselbe an der Wandung entstandenen Unebenheiten.

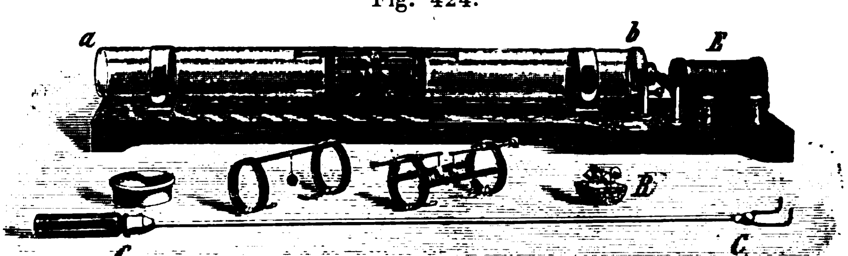
Frage 827. Von welchem Einflusse ist der Druck des die Wellenröhre erfüllenden Gases auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in derselben?

Antwort. In weiteren Röhren ist diese Geschwindigkeit unabhängig von dem Gasdrucke; in engen Röhren dagegen tritt bei vermehrtem Drucke auch eine Vergrösserung der Schallgeschwindigkeit ein.

Frage 828. Was für einen Apparat hat Walter König in Frankfurt a. M. zum Zwecke der Erklärung der Entstehung der Kundt'schen Staubfiguren konstruiert, und was lehren die mit diesem Apparate angestellten Versuche?

Antwort. Der von Walter König konstruierte Apparat zeigt die zwischen zwei kleinen, leicht beweglichen Kugeln auftretenden Anziehungen und Abstossungen, sobald sie sich in einer hin- und herschwingenden Luftmasse befinden. Der Apparat (Fig. 424) be-

Fig. 424.



Erkl. 760. Die Ausbildung flacher Querwände, die wir bei dem Kundtschen Versuche wahrnehmen, wird noch dadurch befördert, dass die Korkteilchen nicht rund, sondern durchaus unregelmäßig gestaltet sind. Solche Körper haben in einer schwingenden Luftmasse das Bestreben, sich mit ihrer Längsrichtung quer gegen die Schwingungsrichtung zu stellen. Um auch diese Erscheinung im großen zeigen zu können, ist dem Apparate ein drittes Gestell *cc* Figur 424 beigegeben, das ebenfalls in die Röhre eingeschoben werden kann, und das am Ende einen kleinen Haken trägt. An diesem können dann kleine, flache oder länglich gestaltete Körper, z. B. Papierscheibchen, an Kokonfäden leicht drehbar aufgehängt werden. Sobald die Luftschwingungen erregt werden, stellen sich die aufgehängten Körper mit ihrer Längsrichtung stets senkrecht zur Schwingungsrichtung. Auch ist dem Apparate, welcher von den mechanischen Präzisionswerkstätten von Ferdinand Ernecke, Berlin SW. zu dem Preise von 54 Mark, der Form der Figur 424 entsprechend, zum Experimentieren fertig bezogen werden kann, ein aus Aluminium angefertigtes Schallradiometer *R* beigegeben, dessen schnellere oder langsamere Drehungen gestatten, die Stärke der Schwingungen in den verschiedenen Teilen der Röhre miteinander vergleichen zu können.

Um auch mit den tieferen Tönen einer Stimmgabel Staubfiguren zu erregen, schnitt H. J. Oosting aus Kork ein Stück von der in Fig. 430 a angegebenen Form, mit einer Oeffnung, die genau auf eine Zinke einer Stimmgabel von 256 Schwingungen paßt. Die Figuren wurden erregt in einer am einen Ende mit einem Stöpsel verschlossenen Glasröhre von 35 mm innerem Durchmesser und 1 m Länge. Als Pulver diente Korkfeile. Das kreisförmige Ende des Korkstücks, dessen gesamte Länge 40 mm betrug, und welches so leicht als möglich sein muß, um das Schwingen der Stimgabel so wenig als

steht aus einer Glasröhre von 55 cm Länge bei 4½ cm Weite, die bei *a* offen, bei *b* durch eine Kautschukmembran verschlossen ist. Die Röhrenluft wird dadurch in starke Schwingungen versetzt, dass gegen die Mitte der Membran ein Kork schlägt, der an dem frei schwingenden Ende einer andererseits festgeklemmten stählernen starken Feder befestigt ist. Diese Feder wird elektromagnetisch in Schwingungen erhalten. Sie ist 9 cm lang, 1 cm breit. Den Kontakt bildet eine Bürste aus Platindraht, die einem verstellbaren Platinbleche gegenübersteht und an dem freien Ende ausser dem Korke eine kleine Eisenmasse trägt, um den Schwingungen größere Wucht zu verleihen. Der Elektromagnet *E* nebst Feder und Kontakt und die Glasröhre sind zusammen auf einem schmalen Holzbrette angeordnet; die Röhre ruht auf zwei Lagern, in denen sie parallel mit sich selbst verschoben und in beliebiger Lage festgeklemmt werden kann. Durch eine Elektrizitätsquelle wird die Feder in lebhafte Schwingungen versetzt. Verschiebt man dann die Röhre in ihren Lagern, so lässt sich die Stellung der Membran gegen den aufschlagenden Kork leicht so regulieren, dass neben dem Geräusche des Anschlagens der Eigenton des Rohres deutlich hörbar wird. In dieser Stellung haben die Luftschwingungen in dem Rohre die gewünschte Stärke und Regelmäßigkeit. Streut man Korkfeilicht in die Röhre, so bleibt dieses in der Nähe der Membran in Ruhe; weiter hin ordnet es sich in den Kundt'schen Rippenfiguren an, deren Abstand mit der Annäherung an das offene Ende *a* zunimmt; in der Nähe dieses Endes wird der Staub heftig emporgewirbelt und zum Teil hinausgeschleudert.

möglich abzuändern, wird in die Glasröhre hineingeschoben, und die Stimmgabel so angewandt, wie es in Fig. 430 *b* angegeben ist. Dieselbe wurde mit einem Cellobogen gestrichen. Die Rippen entstanden sehr schön und hatten durchschnittlich einen Abstand von 4 mm.

Fig. 425.

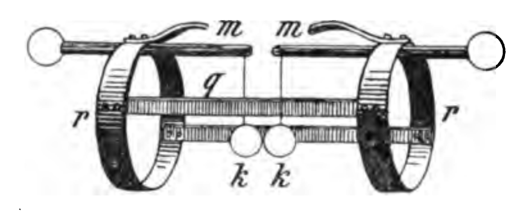
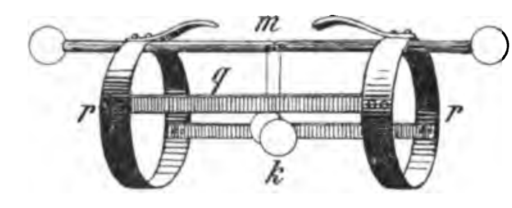


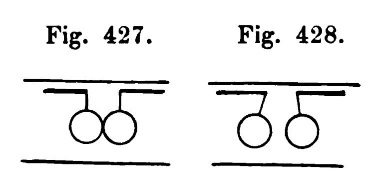
Fig. 426.



Oosting wandte dieselbe Stimmgabel noch in folgender Weise an. Das offene Ende des Resonanzkästchens der Stimmgabel wurde mit Pappe verschlossen, mit Ausnahme einer Oeffnung in der Mitte, in welche die Glasröhre mit ihrem einen Ende etwa 1 cm tief hineingeschoben wurde. Beim Anstreichen der Stimmgabel ergaben sich dieselben Figuren wie vorher. Als die Stimmgabel statt an den Enden in der Mitte angestrichen wurde, gab sie einen kräftigen Oberton. Die Messung ergab für die Wellenlänge der dabei gebildeten Staubfiguren 225 mm. Die Schwingungszahl des Obertones war also sechsmal so groß, als die des Grundtones.

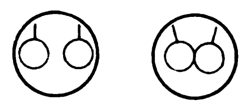
Um diese Anordnung des Staubes zu erklären, muss man zeigen, welche Kräfte zwischen zwei Körpern in einer schwingenden Luftmasse wirksam sind. Zu diesem Zwecke sind dem Apparate zwei kleine Gestelle (Fig. 425 und 426) beigegeben, die in die Glasröhre eingeschoben werden können. Jedes von ihnen trägt zwei kleine Pendelchen; diese bestehen aus dünnem versilberten Kupferdrahte, auf dessen unteres Ende je eine Hollundermarkkugel *k* von zirka 1 cm Durchmesser geschoben ist; das obere Ende ist in eine Oese eingehängt. Die Pendellänge beträgt 2½ cm. Die Oesen sitzen an den Enden horizontaler Messingstäbe *m m*, die in Hülsen verschiebbar sind, und diese Hülsen sind an flachen Ringen *r r* befestigt, die durch Querleisten *q* verbunden, gerade in die Röhre hineinpassen. Das ganze Gestell ist so bemessen, dass es den Innenraum der Röhre möglichst wenig beschränkt, und dass die Pendelkugeln möglichst frei und leicht beweglich inmitten der Röhre hängen. Bei dem einen Gestell (Fig. 425) ist die Anordnung so getroffen, dass die Verbindungslinie der Kugelmittelpunkte in die Längsrichtung der Röhre fällt; die Kugeln hängen im Sinne der Schwingungsrichtung der Luft hintereinander. Hier werden die Stäbchen so eingestellt, dass die Kugeloberflächen sich eben berühren (Fig. 427). Wird das Gestell dann in die Röhre geschoben und die Luft in der beschriebenen Weise in Schwingungen versetzt, so entfernen sich die Kugeln bis zu 4 mm Abstand voneinander (Fig. 428). Bei dem andern Gestell (Fig. 426) sind die Pendelträger so angeordnet, dass die Kugeln im Sinne der Schwingungsrichtung nebeneinander hängen, d. h. die Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte steht auf der

Fig. 427. Fig. 428.



Röhrenachse senkrecht. Hier werden die Kugeln (Fig. 429) so eingestellt, dass 4 bis 5 mm Zwischenraum bleiben; dann ziehen sie sich an (Fig. 430) bis zur Berührung, sobald und solange die Luftschwingungen erregt werden.

Fig. 429. Fig. 430.



Aus diesen Versuchen geht hervor, dass zwischen den Körpern in einer schwingenden Luftsäule bewegende Kräfte vorhanden sind, und zwar stoßen sich die Körper scheinbar ab, wenn sie hintereinander, sie ziehen sich dagegen scheinbar an, wenn sie im Sinne der Schwingungsrichtung nebeneinander sich befinden. Hieraus folgt das Gesetz, welches sich in dem Auftreten der Kundt'schen Staubfiguren ausspricht: B e f i n d e n s i c h nicht zwei, sondern v i e l e u n r e g e l m ä ß i g v e r t e i l t e K ö r p e r c h e n i n e i n e r s c h w i n g e n d e n L u f t m a s s e, s o h a b e n s i e d a s B e s t r e b e n, s i c h i n E b e n e n a n e i n a n d e r z u l a g e r n, d i e s e n k r e c h t z u r S c h w i n g u n g s r i c h t u n g s t e h e n, u n d d i e s i c h g e g e n e i n a n d e r i n e i n e m b e s t i m m t e n A b s t a n d e h a l t e n, d e r v o n d e r S t ä r k e d e r S c h w i n g u n g e n a b h ä n g t. Diese Erscheinung hat man in der Rippenbildung bei den Staubfiguren vor sich.

Fig. 430a.

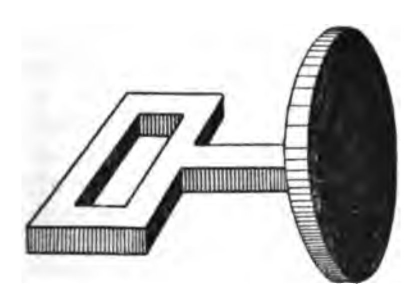
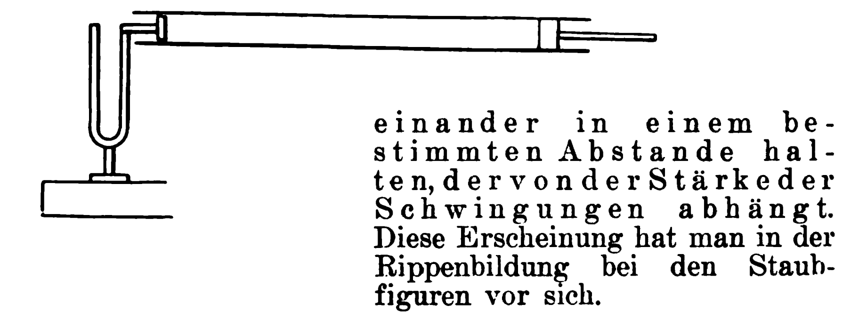


Fig. 430b.



B. Von der Verbreitung des Schalles durch flüssige Körper.

a) Theoretische Ermittelung.

Frage 829. Woraus geht hervor, dass der Schall auch durch flüssige Körper fortgepflanzt wird?

Erkl. 761. Obgleich das Wasser nicht ohne Elastizität ist, wie man bei dem Abspringen eines schief auf das Wasser geworfenen Steines bemerken kann, und obgleich das Wasser eine wenn auch nur sehr geringe Zusammendrückbarkeit besitzt, so dürfte nach Chladni die Schallbewegung durch das Wasser nicht wie in der Luft, durch Zusammendrücken und Wiederausdehnen, sondern vielmehr als eine von dem schallenden Körper dem Wasser durch einen unmerkbar kleinen Raum mitgeteilte Stoßbewegung anzusehen sein.

Wenn man eine Glocke unter Wasser läutet, so erhält man einen tieferen Ton, als wenn die Schwingungen in der Luft geschehen, da die letzteren durch den Widerstand des Wassers verzögert werden. Je tiefer man die Glocke untertaucht, desto langsamer schwingt sie, weil die darüber befindliche Flüssigkeit einen mit der Höhe zunehmenden Druck ausübt. Manche Flüssigkeiten, wie Oel, Milch, Brausewein usw. sind der Schallausbreitung weit mehr hinderlich als das Wasser.

Antwort. Dass der Schall auch durch Wasser verbreitet wird, geht schon daraus hervor, dass Fische, Krebse und andere Wassertiere mit Gehörwerkzeugen versehen sind und durch den Ton einer Pfeife herbei gelockt werden können. Auch haben viele Versuche ergeben, dass man unter Wasser jeden in der Luft erregten Schall, noch stärker aber einen unter Wasser selbst erregten Schall hören kann. So hörte z. B. (1787) Monro, welcher als guter Schwimmer unter Wasser tauchte, deutlich den Schall einer in beträchtlicher Entfernung abgeschossenen Pistole, und Perolle, welcher (1790) eine Taschenuhr, nach Verstopfung aller Fugen, an einem Faden in ein mit einer Flüssigkeit gefülltes Glas herabhängen ließ, überzeugte sich hierdurch nicht bloß von der Leitungsfähigkeit des Wassers für den Schall, sondern ermittelte auch bei Anwendung verschiedener Flüssigkeiten den Unterschied der Stärke dieser Fortpflanzung. (S. auch Seite 110 im I. Bande der Akustik.)

Frage 830. Gleichwie bei den gasförmigen Körpern, so können wir auch bei den Flüssigkeiten die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles sowohl theoretisch berechnen, als auch auf dem Wege des Experiments bestimmen. Wie gestaltet sich die erste Art der Bestimmung, wenn wir wieder von der Newton'schen Formel

$$c = \sqrt{\frac{E}{d}}$$

(s. Antw. auf Frage 798) ausgehen?

Antwort. Wir denken uns eine zylindrische Flüssigkeitssäule von der Grundfläche und der Höhe 1 und der Spannkraft E, die also unter dem Drucke E steht (denn jedem Drucke entspricht ein gleich grosser Gegendruck), und deren Teilchen nur in der Längsrichtung einem Bewegungsimpulse nachgeben können. Hat nun diese Säule überdies noch einen Druck auszuhalten, der ihrem eigenen Ge-

Erkl. 762. Man beweist die Zusammendrückbarkeit und Elastizität tropfbar flüssiger Körper mittelst Oerstedt's Piezometer, dessen genaue Beschreibung in unserem Lehrbuche der Hydrostatik auf Seite 22 zu finden ist.

Erkl. 763. Colladon und Sturm (siehe Antwort auf die folgende Frage), benutzten zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit die von Poisson gefundene Formel, wonach

$$c = \sqrt{Pk/d\lambda}$$

ist, wenn d die Dichtigkeit der Flüssigkeit im Verhältnisse zum Wasser, k die Länge einer Säule unter bekanntem Drucke, λ die Verkürzung dieser Säule für einen gegebenen Zuwachs beim Drucke P bezeichnet. Mittelst eines Piezometers wurde die Kompressibilität des Wassers zu 49,5 Millionstel gefunden, d. h. eine Wassersäule von $k =$ 1 000 000 mm Länge verkürzt sich um 49,5 mm bei einer Atmosphäre Druck, oder 0,76 m Quecksilberhöhe. Wenn bei 10° Temperatur das spezifische Gewicht des Quecksilbers 13,544 zu setzen ist, so ist der Druck $P = 0{,}76 \,.\, 9{,}81 \,.\, 13{,}544$. Diese Werte in die Formel eingesetzt, ergeben

$$c = \sqrt{\frac{0{,}76 \cdot 9{,}81 \cdot 13{,}544 \cdot 1000000}{1 \cdot 49{,}5}}$$

oder $c = 1428$ m.

wichte gleich ist, so wird sich die Höhe oder Länge derselben um ein Stück λ verkürzen. Das Gewicht der Säule läßt sich aber, wenn d ihre anfängliche Dichte und g die Intensität der Schwere ist, durch dg ausdrücken. Daraus ergibt sich das Verhältnis

$$E : dg = (1 - \lambda) : \lambda,$$

oder auch

$$E : d = g\,(1 - \lambda) : \lambda,$$

oder, da λ im Verhältnis zu 1 nur sehr klein ist,

$$E : d = g : \lambda.$$

Daher $\quad c = \sqrt{g/\lambda}.$

Diese Formel können wir nun zur Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in einer Flüssigkeitssäule benutzen, sobald uns der Wert von λ bekannt ist. Mittelst eines Piezometers (siehe Erkl. 762) hat man gefunden, dass sich Wasser durch einen Atmosphärendruck um 49,5 Millionstel seines anfänglichen Volumens zusammendrücken läßt, und dass die Atmosphäre, welche diesen Druck ausübt, gleich einer Quecksilbersäule von 0,76 m Höhe bei der Temperatur von 10° oder gleich einer Wassersäule von 10,29 m ist; sonach würde eine Wassersäule von 1 m Länge eine Verkürzung von $\lambda = 0{,}0\,000\,495/10{,}29$ oder 0,00 000 481 m erfahren. Setzen wir diesen Wert für λ in obige Formel ein, so findet man die Schallgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{9{,}81/0{,}00\,000\,481}$$

oder $\quad c = 1428$ m.

---

b) Experimentelle Ermittelungen.

Frage 831. Von welchen Physikern und in welcher Weise wurde die Geschwindigkeit des Schalles im Wasser auf dem Wege des Experiments bestimmt?

Antwort. Die beiden Physiker Colladon und Sturm haben im Jahre 1826 die Schallgeschwindig-

Erkl. 764. Bei den nebenstehend beschriebenen Versuchen zeigten sich folgende Eigentümlichkeiten des Schalles im Wasser:

1). Es ist hier kein klingender, langanhaltender Glockenton wahrnehmbar, wie beim Fortgange des Schalles durch die Luft, sondern ein kurzer Stoß, wie beim Zusammenschlagen zweier Metallstücke, infolge der geringen Elastizität des Wassers, welches durch die mitgeteilten Stöße nicht wie die Luft in eigene Schwingungen übergeht.

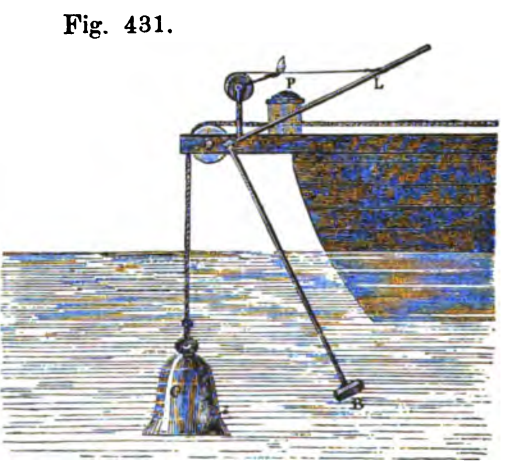
2). Die Schallstrahlen gehen aus dem Wasser nicht in die Luft über, wenn die im Wasser fortgehenden Wellen die Oberfläche unter einem sehr spitzen Winkel treffen; denn in einem größeren Abstande als 200 m von der Glocke hörte man den Ton derselben bedeutend schwächer und in 400 bis 500 m Entfernung vernahm auch das dicht über das Wasser gehaltene Ohr gar nichts mehr.

3). Die Wellen, welche das Wasser mechanisch bewegen, haben auf die Fortpflanzung des Schalles keinen Einfluß. Am letzten Tage der Beobachtungen war der See so unruhig, dass die Boote kaum festzuhalten waren, und dennoch war die Stärke und Geschwindigkeit der Schallfortpflanzung unverändert.

keit im Wasser des Genfer See's gemessen. Als Versuchsstrecke diente die grösste Entfernung, die man auf dem Genfer See über allseitig hinlänglich tiefem Wasser zwischen der franz. Stadt Thonon und dem Landstädtchen Rolle zu erhalten vermochte, und welche nach genauen Messungen 13 487 m betrug. In der Nähe von Rolle wurde ein Boot festgelegt, welches eine in das Wasser gesenkte, 65 kg schwere und etwa 70 cm hohe

Fig. 431.





Glocke trug. Ein im Boote befindlicher Gehilfe schlug nach verabredeten Zwischenzeiten vermittelst des Hebels L den Hammer B gegen die Glocke, wobei zugleich eine glimmende Lunte das zum Signal dienende Schießpulver P im Betrage von 125 g entzündete. Ein zweites Boot lag bei Thonon vor Anker. Von den hier befindlichen Beobachtern wurde das Aufblitzen des Pulvers, welches mit dem gleichzeitigen Anschlagen der Glocke geschah, sowie die Ankunft des Schalles überwacht. Zur Zeitmessung diente ein mit einem leichten Drücker versehenes Zählwerk, welches arretiert wurde bis zum Erscheinen des Blitzes, dann bis zur abermaligen Arretierung beim ersten Wahrnehmen des Schalles

Erkl. 765. Die Stärke des durch Wasser verbreiteten Schalles ist viel beträchtlicher als bei dem durch die Luft verbreiteten Schalle. Nollet fand beim Untertauchen den durch Zusammenschlagen zweier in den Händen gehaltenen Steine erregten Schall fast unerträglich stark. Einen in der Luft erregten Schall hört man unter Wasser zwar deutlich aber weniger stark, weil die Luft als sehr wenig dichte Materie dem Wasser als einer weit dichteren Materie, diese Bewegung nicht so stark mitteilen kann.

Erkl. 766. Die ersten Versuche, die Geschwindigkeit des Schalles in Flüssigkeiten zu messen, wurden von Beudant ausgeführt. Derselbe ließ auf dem Meere bei Marseille zwei Kähne in gemessener Entfernung voneinander befestigen; in dem einen derselben schlug ein Gehilfe an eine im Wasser befindliche Glocke und gab zugleich ein Zeichen, welches von dem Beobachter im anderen Kahne bemerkt wurde. Ein anderer Gehilfe tauchte und zeigte dem Beobachter die Ankunft des Schalles unter Wasser an. Die Differenz der beiden Zeichen gab die Zeit, welche der Schall gebraucht hatte, um sich im Wasser fortzupflanzen. Beudant fand etwa 1500 m, doch legte er auf das Resultat so wenig Gewicht, daß er es nicht veröffentlichte. Seine Versuche sind in der Arbeit von Colladon und Sturm erwähnt.

fortging, und auf diese Weise die Zwischenzeit bis auf $1/4$ Sekunde genau angab. Da der entstandene, nur kurze Schall (siehe Erkl. 764) über dem Wasser nicht wahrnehmbar, das Eintauchen des Ohres aber beschwerlich war, so wurde ein besonderes Hörrohr ins Wasser gesenkt, welches aus einer 5 m langen konischen, unten erweiterten Blechröhre bestand, deren obere, spitz zulaufende und etwas schräg gerichtete Oeffnung gegen das Ohr gehalten wurde. Die grosse, überall gleichmäßige Tiefe von 140 m, die Klarheit und Reinheit des Wassers (welches nach den vorgenommenen Untersuchungen nur 1/6000 an festen Bestandteilen enthält), waren für diese Versuche besonders günstig. Aus 44 Beobachtungen ergab sich ein Mittelwert von 9,4 Sekunden für die Zeit, welche der Schall gebrauchte, um von dem einen Boote nach dem andern zu gelangen, oder einen Weg von 13 487 m im Wasser zurückzulegen, und demnach beträgt die Schallgeschwindigkeit $c =$ 13 487/9,4 oder 1435 m in einer Sekunde.

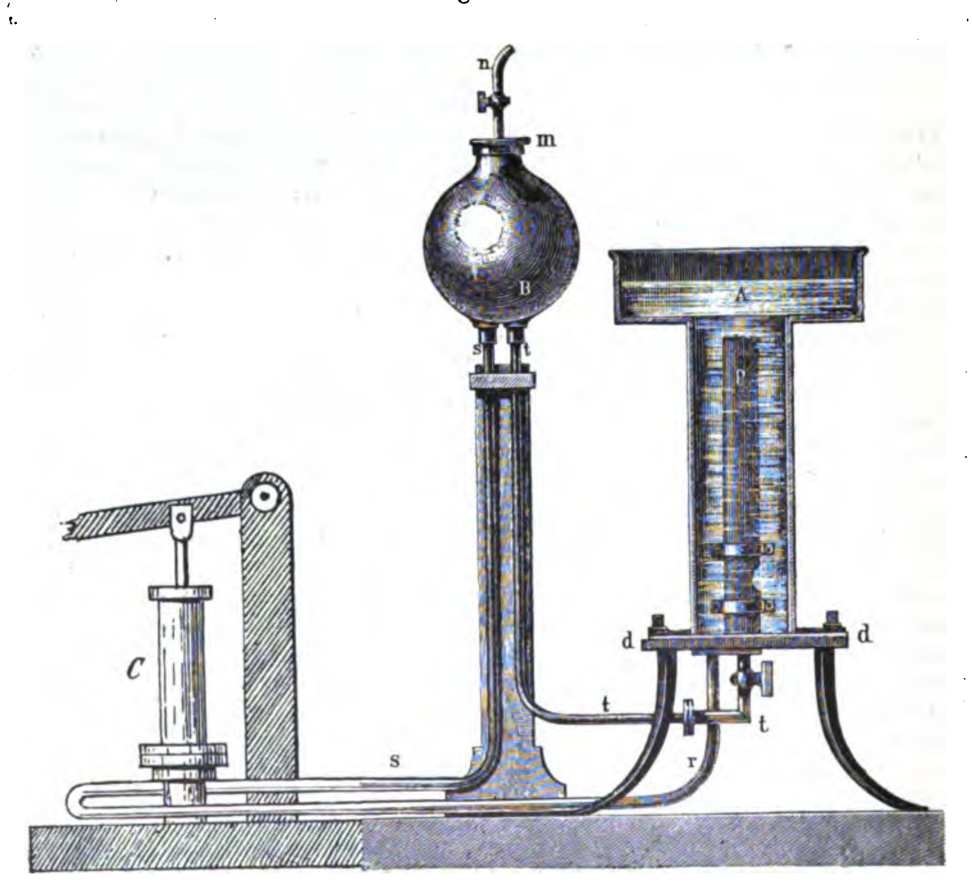
Frage 832. Das Wasser ist aber nicht allein imstande den Schall f o r t z u l e i t e n, sondern es kann unter Umständen auch als t ö n e n d e r Körper wirksam sein. Welchen Apparat benutzte Wertheim, um eine Wassersäule ebenso in t ö n e n d e S c h w i n g u n g e n zu versetzen, wie es mit Luftsäulen geschieht, und mittelst derselben zugleich die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten zu messen?

Antwort. Wertheim's Apparat besteht aus einem Behälter für die Flüssigkeit, aus einer Orgelpfeife, einer Pumpe, einem Behälter mit Luft und einem Manometer. Der Behälter *A* (siehe die nachstehende Fig. 432) für die Flüssigkeit, besteht aus einem Zinkzylinder von 52 cm Höhe und einem kleinen Bassin auf seinem Scheitel. Dieser Zylinder ist auf der Bronzeplatte *d d* festgelötet, die

Erkl. 767. Die Pfeife p war mit einem Mundstücke versehen, dessen beide Lippen d und e (Fig. 433) sich vermittelst der Klemmringe $f\,f$ in beliebige Entfernung voneinander stellen ließen, denn man muß erst durch den Versuch die Lage ermitteln, die man den Lippen zu geben hat, damit die Pfeife in der Flüssigkeit anspreche, da es sehr häufig geschieht, daß eine für Luft vollkommen gut angesetzte Pfeife keinen Ton in Flüssigkeiten gibt, oder erst bei einem ungewöhnlich starken Drucke zu tönen beginnt. Im übrigen bestand die Pfeife p aus drei einzelnen

wieder einem eisernen Stativ aufgebolzt ist. Die horizontale Platte dieses Stativs verschliesst die untere Oeffnung des Zylinders A; sie hat drei Löcher: das eine, in der Mitte, nimmt ein Treibrohr t auf, um die Pfeife p von unten her mit Wasser anzublasen, das zweite ein Saugrohr r, welches zur Pumpe C

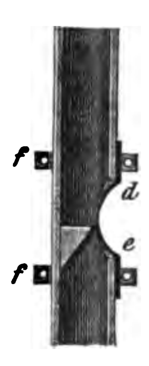
Fig. 432.



führt, und das dritte, ein in der Figur nicht sichtbares Rohr zum Entleeren des Apparates. Die Pfeife p ist an ihrer Basis auf das Ende einer zentralen Röhre geschraubt, steht senkrecht und ist sowohl von der Flüssigkeit umgeben als auch mit ihr angefüllt. Die Pumpe C saugt die Flüssig-

Teilen, die aneinander geschraubt und durch das Aufschrauben einer Kappe auf das letzte Gewinde geschlossen werden konnten. Wertheim beabsichtigte, die Störung an dem Mundstücke bei der geschlossenen Pfeife, sowie die Summe der Störungen an beiden Enden bei der offenen Pfeife zu untersuchen. Er fand jedoch bald, dass er mit einer geschlossenen Pfeife überhaupt nicht experimentieren konnte, da der Deckel an den

Fig. 433.



Schwingungen der Flüssigkeitssäule immer lebhaft teilnahm, desshalb beschränkte er sich auf Versuche mit der offenen Pfeife; aber selbst in diesem Falle teilt sich die Bewegung den Wänden noch mit, und so erklärt sich hieraus der geringe Wert, den Wertheim für die Schallgeschwindigkeit im Wasser fand.

Wertheim zog aus seinen Versuchen die weitere Folgerung, dass die Schwingungen einer flüssigen Säule isochron sind mit denen eines starren Stabes von derselben Länge und aus einem Materiale von gleicher Zusammendrückbarkeit mit der der Flüssigkeit.

keit durch die Röhre r auf, und treibt sie durch das Steigrohr s in den Windkessel B. Der letztere, von Kupfer, und 30 cm im Durchmesser, hat oben ein grosses Loch, verschlossen durch eine Platte m mit einer Tubulatur zur Aufnahme der Verbindungsröhre n, die zu einem Manometer führt. Die Luft in B läßt sich so verdichten, dass das Manometer einen bestimmten Druck anzeigt, und man kann es auf diesem Drucke erhalten, während das Wasser in die Pfeife strömt, wenn man mit einer entsprechenden Geschwindigkeit pumpt.

Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich in einer Flüssigkeitssäule nach der für offene Pfeifen gültigen Gleichung $c = 2\,l\,n$. Wertheim erhielt auf diese Weise für die mittlere Geschwindigkeit des Schalles in einer Wassersäule von der mittleren Temperatur 15° C die Zahl 1173,4 m. Nun hat aber Wertheim dargetan, dass sich die Schallgeschwindigkeit in einer unbegrenzten Masse zu der in einem Faden von derselben Substanz verhält wie $\sqrt{3/2} : 1$. (S. Frage 844.) Dies gilt auch für tropfbare Flüssigkeiten. Die Schallgeschwindigkeit in einer unbegrenzten Wassermasse von 15° Temperatur ist hiernach

$$c = 1173{,}4 \,.\, \sqrt{3/2}$$

oder

$$c = 1437{,}1 \text{ m}.$$

Die direkte Beobachtung ergab bei 9° C die Zahl 1435 m. Die nahe Uebereinstimmung dieser beiden Zahlen zeigt, dass das von Wertheim theoretisch abgeleitete Gesetz des Gleichgewichts starrer Körper auch für Flüssigkeiten gültig ist.

Frage 833. Mit Hilfe welcher Formel kann man aus der bekannten Zusammendrückbarkeit einer Flüssigkeit die Schallgeschwin-

Antwort. Sind für eine Flüssigkeit bei gegebener Temperatur: c die Schallgeschwindigkeit in

digkeit, und umgekehrt aus der bekannten Schallgeschwindigkeit die Kompressibilität herleiten?

Erkl. 768. Wertheim hat für eine Reihe von Flüssigkeiten die Schallgeschwindigkeit bestimmt und daraus die Zusammendrückbarkeit (oder Kompressibilität) der Flüssigkeiten berechnet. Seine Resultate mit denen von Grassi zusammengestellt, gibt folgende Tabelle:

einer unbegrenzten Masse, c_1 die Schallgeschwindigkeit in einer Säule oder einem Faden, d die Dichte und l die kubische Zusammendrückbarkeit unter dem Drucke von einer Atmosphäre, so hat man

$$c^2 = 3/2\, c_1^2, \text{ und } l = \frac{9{,}81 \cdot 0{,}76 \cdot 13{,}596}{d \cdot c^2}$$

(Vergleiche hiermit Erklärung 763).

Flüssigkeit	Temperatur	Dichte	Schallgeschwindigkeit in der Säule	Schallgeschwindigkeit in der unbegrenzten Flüssigkeit	Kompressibilität nach Wertheim	Kompressibilität nach Grassi
			Meter	Meter		
Seinewasser	15°,0	0,9996	1173,4	1437,1	0,0000491	—
do.	30,0	0,9963	1250,9	1528,5	0,0000433	—
do.	40,0	0,9931	1324,8	1622,5	0,0000388	—
do.	60,0	0,9901	1408,2	1724,7	0,0000346	—
Meerwasser	20,0	1,0264	1187,0	1453,8	0,0000467	0,0000445
Lösung von Kochsalz 36,90 %	18,0	1,1920	1275,0	1561,6	0,0000349	0,0000321
Lösung v. schwefels. Natron 13,35 %	20,0	1,1089	1245,2	1525,1	0,0000393	—
„ 20,27 %	18,8	1,1602	1292,9	1583,5	0,0000348	—
Lösung von kohlens. Natron 20,7 %	22,2	1,1	1301,8	1594,4	0,0000337	0,0000303
Lösung von salpeters. Natron 37,5 %	20,9	1,2066	1363,5	1669,9	0,0000301	0,0000306
Lösung von Chlorcalcium 76,5 %	22,5	1,4322	1616,3	1979,6	0,0000181	0,0000209
Alkohol 36° B.	20,0	0,8362	1049,9	1285,9	0,0000733	—
Alkohol absol.	23,0	0,7960	947,0	1159,8	0,0000947	0,0000991
Terpentinöl	24,0	0,8622	989,8	1212,3	0,0000800	—
Schwefeläther	0,0	0,7529	946,3	1259,0	0,0001002	0,000111

Frage 834. Trotz der sehr guten Uebereinstimmung zwischen den von Wertheim und Grassi gegebenen Kompressionskoeffizienten, hat schon Helmholtz darauf hingewiesen, dass der Unterschied der Schallgeschwindigkeit in einem Stabe und einer ausgedehnten Masse eines festen Körpers auf welchen Umstand zurückzuführen ist?

Erkl. 769. Die Abweichung von dem von Colladon und Sturm gefundenen

Antwort. Der Unterschied der Schallgeschwindigkeit in einem Stabe und einer ausgedehnten Masse eines festen Körpers rührt daher, dass der Stab sich in seinen Querdimensionen frei ändern kann, in der ausgedehnten Masse dagegen nicht. Eine solche freie Aenderung der Querdimensionen findet in einer Flüssigkeitspfeife nicht statt. Allerdings ist die Pfeifenwand nicht absolut fest, und es muss desshalb eine Verzögerung

Werte für die Schallgeschwindigkeit vermindert sich mit zunehmender Wandstärke und abnehmendem Durchmesser der Röhre, da hierdurch der Widerstand der Wand wächst, aber er vermindert sich nicht so sehr, dass man nach dieser Methode die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten messen könnte. Dagegen eignet sich diese Methode vorzüglich zur Ermittelung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern. (Siehe Antwort auf Frage 820 und folgende.)

der Flüssigkeitsschwingungen eintreten, welche von dem Durchmesser der Röhre, von der Dicke ihrer Wandung und der Elastizität des Pfeifenmaterials abhängt.

Frage 835. In welcher Weise ist es Kundt und Lehmann (1874) gelungen, die Bemerkung von Helmholtz (1870) als richtig nachzuweisen?

Erkl. 770. Die bei den Kundt'schen Versuchen aus den gemessenen Wellenlängen sich ergebende Geschwindigkeit c des Schalles bei der Temperatur t gibt die folgende Tabelle die unter δ die Wandstärke und unter D den lichten Durchmesser der Röhre enthält:

δ	D	c	t^0
2,2 mm	28,7 mm	1040,4 m	18,4
3,0 „	34,0 „	1227,7 „	17,0
3,0 „	23,5 „	1262,2 „	18,0
3,5 „	21,0 „	1357,6 „	18,5
5,0 „	16,5 „	1360,2 „	18,5
5,0 „	14,0 „	1383,2 „	22,2

Antwort. Kundt gelang es, in Flüssigkeiten ganz ebensolche Staubfiguren und nach derselben Methode hervorzurufen, wie in Gasen, wenn er dafür sorgte, dass die Flüssigkeiten absolut luftfrei waren. Als Pulver benutzte er sehr fein gepulvertes Eisen (*ferrum limatum*). Die Messung der Wellenlänge ergab dann die Geschwindigkeit des Schalles im Wasser gerade wie in der Luft.

Die Resultate die Kundt und Lehmann erhielten, entsprachen genau den Bemerkungen von Helmholtz, die Geschwindigkeit des Schalles nahm zu, wenn der Durchmesser der Flüssigkeitssäule abnahm und die Wandstärke der Röhre zunahm. (Siehe die nebenstehende Tabelle.)

Frage 836. Durch welche Versuchsanordnung erhielt Dvorak (1875) ähnliche Resultate wie Kundt?

Erkl. 771. Dvoráks Verfahren hat gegenüber dem Kundt'schen den Vorteil, dass das Wasser nicht luftfrei zu sein braucht. Folgende Tabelle enthält einige Beobachtungen, welche sehr gut

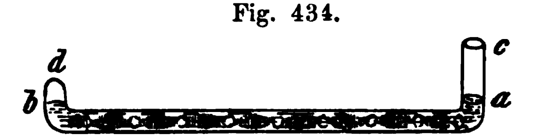
Antwort. Dvorak hat die Schallgeschwindigkeit bei Flüssigkeiten in Röhren nach folgender Methode untersucht. Eine horizontale etwa 2 m lange Röhre, die an ihrem einen Ende geschlossen war, wurde an beiden Enden vertikal umgebogen, das offene Ende etwa 10 cm, das geschlossene Ende nur kurz. Die Röhre wurde dann mit Wasser gefüllt und an das geschlossene

mit denen von Kundt und Lehmann übereinstimmen.

δ	D	c
0,82 mm	17,9 mm	998 m
0,63 „	11,7 „	1046 „
0,52 „	8,46 „	1164 „
2 „	15 „	1213 „
2 „	11 „	1281 „

Ende eine grosse Luftblase gebracht, so dass die Wassersäule dort durch Luft begrenzt war. Das aufsteigende offene Ende enthielt nur wenig Wasser und wurde als Orgelpfeife angeblasen, indem

Fig. 434.



man kräftig über die Röhre hinwegblies. Die Schwingungen dieser Luftsäule teilten sich dann dem Wasser mit, und in demselben liessen sich die Knotenlinien, hergestellt durch salpeterfreies Schießpulver, sehr gut messen.

C. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in festen Körpern.

a) Allgemeines.

Frage 837. Aus welchen Erscheinungen geht zunächst hervor, dass auch feste Körper den Schall, und zwar schnell und sehr stark fortpflanzen?

Erkl. 772. Ein fester Körper pflanzt den Schall besonders gut fort, wenn er eine stabförmige Gestalt hat, und an die Zähne oder an andere feste Teile des Kopfes gestemmt wird, durch welche die Erschütterung leicht bis zum Gehörnerv gelangen kann. Ein bloser Faden reicht schon hin, den Schall fortzuleiten; wenn z. B. zwei Personen einen starken Faden an den Enden zwischen den Zähnen etwas gespannt halten, so werden sie sich bei verstopften Ohren in einer ziemlichen Entfernung unterhalten können. Im ersten Bande unserer Akustik sind auf Seite 106 u. f. eine ganze Reihe analoger Erscheinungen erwähnt, welche alle die nämliche Tatsache beweisen.

Antwort. Eine der bekanntesten Tatsachen, dass feste Körper den Schall schnell und sehr stark fortpflanzen, ist folgende. Wenn ein Beobachter das Ohr an das eine Ende eines langen, tannenen Balkens legt, so wird er das Geräusch hören, welches man erzeugt, indem man mit dem Barte einer Feder über die Enden der Holzfasern am anderen Ende des Balkens hinfährt, obwohl dieses Geräusch in der Luft so schwach ist, dass es derjenige, welcher es hervorbringt, kaum vernimmt. Der Balken kann 20 bis 25 m lang sein. Ebenso vernimmt man den Schlag einer Taschenuhr durch einen langen Stab, wie man denn auch bekanntlich den Donner der Kanonen auf eine sehr beträchtliche Entfernung durch die Erde hin hört.

Frage 838. Durch welchen Versuch kann man beweisen, dass sich der Schall durch einen festen Körper wesentlich schneller fortpflanzt als durch die Luft?

Erkl. 773. Folgende Versuche über das Schallleitungsvermögen wurden von N. Hesehus ausgeführt: Mehrere gleich lange Stäbe aus verschiedenen Stoffen werden mit der Hand auf einen Tisch, besser noch auf einen Resonanzkasten aufgesetzt, und ihre oberen Enden nacheinander mit einer tönenden Stimmgabel berührt; die Stärke des Schalles gibt einen Maßstab für das Schallleitungsvermögen. Zu den Versuchen dienten 6 Stäbchen aus Kautschuk, Kork, Guttapercha, Holz, Glas und Stahl, die zu je dreien mittelst Gummiröhrchen und Gummiringen vereinigt waren, um bequem zugleich in der Hand gehalten werden zu können; der schlaffe Kautschukstab war überdies zwischen zwei dünne Holzplättchen gelegt. Wurde die Stimmgabel an diesen gehalten, so war kein Schall zu hören, dagegen nahm die Schallstärke stufenweise zu, wenn man der Reihe nach die anderen Stäbchen berührte.

Antwort. Wir bringen zwei Holzkisten in eine Entfernung von mindestens 50 m voneinander, schlagen in jede einen starken Nagel ein und spannen zwischen diesen einen dicken und möglichst straff gespannten Bindfaden aus. Klopfen wir nun mit einem Holzstückchen abwechselnd auf die beiden Kisten, so hören wir zwei ganz deutliche Töne, von denen der durch den Bindfaden ankommende merklich früher anlangt, als derjenige, der sich durch die Luft fortpflanzt. Auch zwei in weichem Boden eingeschlagene Pflöcke können zu diesem Zwecke benutzt werden. Einander gegenüberstehende Holzplanken längerer Gärten eignen sich für diese Versuche sehr gut, namentlich da wir hier auch einen dritten Schlag, welcher durch den Erdboden anlangt, ganz deutlich hören. (Nach Antolik.)

Frage 839. Welche Körper haben sich als die besten Schallleiter erwiesen und von welchem Einflusse sind die Dimensionen des festen Körpers auf das Schallleitungsvermögen?

Antwort. Die besten Schallleiter sind diejenigen Körper, in denen die Geschwindigkeit des Schalles am größten ist. (Aluminium, Stahl, Glas.) Je größer die durch die innere Reibung bedingte Eigenschaft der elastischen Nachwirkung in den Körpern ist, desto geringer ist die Schallleitung (Kautschuk, Blei). Weitere Versuche zeigten, dass die Schallleitung direkt proportional dem Querschnitte, und umgekehrt proportional der Länge des Körpers ist.

---

b) Theoretische Ermittelung der Schallgeschwindigkeit.

Frage 840. Inwiefern können wir auch zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern die Newton'sche Formel (Antwort auf Frage 798) benutzen?

Antwort. Hier gilt zunächst als allgemeines Gesetz, dass die Elastizität im Verhältnisse zu der Dichtigkeit größer als in Flüssigkeiten ist, und folglich auch die Fortpflanzung des Schalles schneller erfolgt.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer longitudinalen Erschütterung in einem festen Stabe ist ebenfalls $c = \sqrt{\frac{E}{d}}$, wobei E den Elastizitätsmodul und d die Dichte des Körpers bedeutet. Führt man anstelle von d das spezifische Gewicht s ein, so erhält man

$$c = \sqrt{\frac{Eg}{s}}.$$

Diese Formel, welche wir schon in Aufgabe 9 und 10 (I. Bd. der Akustik) sowie in Aufgabe 106 (II. Bd. der Akustik) angewandt haben, wollen wir hier beispielsweise auf die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in einem unendlich langen Eisenstabe anwenden. Der Elastizitätsmodulus des Eisens, bezogen auf das Quadratmillimeter, beträgt rund 20 000 kg. Für ein Quadratmeter ist also $E = 20\,000\,000\,000$. Das spezifische Gewicht des Eisens ist etwa 7,7, somit das Gewicht eines Kubikmeters 7700 kg; man hat demnach

$$c = \sqrt{\frac{9{,}81 \cdot 20000000000}{7700}}$$

oder $c = 5048$ m,

also etwa das 15fache der Geschwindigkeit in der Luft.

Erkl. 774. Auf dieselbe Weise würden wir für die Schallgeschwindigkeit in den verschiedenen festen Körpern, die in die Form von dünnen Stäben, Drähten oder Röhren gebracht sind und sich seitlich frei ausdehnen oder zusammenziehen können, finden:

Tannenholz	6000 m,	d. h. das	18 fache d. Geschwindigkeit i. d. Luft.
Glas	5200 „	„ „	15,5 „
Stahl	5200 „	„ „	15,5 „
Eisen	5100 „	„ „	15,0 „
Gusseisen	4300 „	„ „	12 „
Kupfer	3750 „	„ „	11 „
Messing	3550 „	„ „	10,5 „
Platin	2650 „	„ „	8 „
Silber	2600 „	„ „	7,5 „
Gold	1750 „	„ „	5 „
Blei	1200 „	„ „	3,5 „

Frage 841. Welche andere, schon früher erwähnte Formel ist auch für die Ermittelung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des

Antwort. Die in Antwort auf Frage 830 (sowie Seite 165, II. Bd. der Akustik) gegebene Formel

Schalles in festen Körpern anwendbar?

Erkl. 775. Borda fand, dass Messing von einem Meter Länge durch ein dem seinigen gleiches Gewicht um 0,000 000 774 Meter zusammengedrückt werde, so dass dann durch Einsetzen dieses Wertes in die nebenstehende Formel die Schallgeschwindigkeit im Messing

$$c = \sqrt{\frac{9,81}{0,000000774}}$$

oder

$$c = 3560 \text{ m}$$

beträgt.

$c = \sqrt{\frac{g}{\lambda}}$, wo man für λ auch die Verlängerung nehmen kann, welche ein Stab von 1 m Länge erfährt, wenn er durch ein dem seinigen gleiches Gewicht ausgezogen oder zusammengedrückt wird. D. h. die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen Wellen in einem Stabe ist gleich der Quadratwurzel des Quotienten aus der Beschleunigung des freien Falles und der Verlängerung, welche ein Stab von der Länge 1 durch ein seinem eigenen gleiches Gewicht erfährt.

---

c) Ermittelung der Schallgeschwindigkeit durch entsprechende Versuche.

Frage 842. Welche Methode gab Chladni an, um die Geschwindigkeit des Schalles in festen Körpern zu messen?

Erkl. 776. Nach der nebenstehend beschriebenen Methode haben Chladni sowohl wie auch Savart die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in verschiedenen festen Körpern bestimmt. Die folgende Tabelle enthält einige der von Chladni erhaltenen Resultate:

Namen der Substanzen	Geschwindigkeit, verglichen mit der Schallgeschwindigkeit in der Luft
Fischbein	$6^2/_3$
Zinn	$7^1/_2$
Silber	9
Nussbaumholz	$10^2/_3$
Messing	$10^2/_3$
Eichenholz	$10^2/_3$
Kupfer	12
Ahornholz	$12^1/_2$
Akazienholz	$14^2/_5$
Ebenholz	$14^2/_5$
Erlenholz	$14^2/_5$
Lindenholz	15
Glas	$16^2/_3$
Eisen oder Stahl	$16^2/_3$
Tannenholz	18

Antwort. Es sei c die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft, l die Länge einer beiderseits offenen Pfeife, und n die Anzahl der Schwingungen, welche die Luftsäule der Pfeife in einer Sekunde macht, wenn dieselbe ihren Grundton gibt. Die Länge jeder Luftwelle, die hier erregt wird, ist dann gleich l, und die Gesamtlänge der Wellen, welche den n Schwingungen in einer Sekunde entsprechen, gleich nl; diese Länge ist aber gleich der Geschwindigkeit c, d. h. dem Wege, welchen der Schall in einer Sekunde durchläuft. Da nun die Longitudinalschwingungen von Stäben, deren beide Enden frei sind, ganz den Gesetzen der stehenden Schwingungen in Röhren eingeschlossener Luftsäulen folgen, so ist auch, wenn c_1 die Schallgeschwindigkeit in irgend einem festen Körper, l die Länge eines zylindrischen Stabes aus dieser Substanz, und n_1 die Anzahl der Longitudinal-

schwingungen, welche der Stab in einer Sekunde macht, sobald er den Grundton gibt, bezeichnet, auch $c_1 = n_1 l$. Diese und die vorhergehende Gleichung geben aber $c_1/c = n_1/n$, woraus folgt, dass man, um die Geschwindigkeit des Schalles in irgend einem festen Körper zu finden, nur auf den Grundton des entsprechenden Stabes zu hören und ihn mit dem Grundtone einer offenen Pfeife von derselben Länge zu vergleichen braucht. Das Schwingungsverhältnis zwischen diesen Tönen (n_1/n), multipliziert mit der Geschwindigkeit c des Schalles in der Luft, gibt als Produkt die gesuchte Geschwindigkeit.

Frage 843. Warum ist es bei dieser Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern gerade nicht notwendig, dass die Pfeife und der Stab von gleicher Länge sind?

Erkl. 777. So findet man z. B., dass ein 1 m langer Stab von Erlenholz, einen Longitudinalton gibt, welcher dem Longitudinaltone einer 7 cm langen Pfeife gleicht. Die Wellenlänge eines Tones im Erlenholze verhält sich demnach zur Wellenlänge desselben Tones in der Luft wie 1 : 0,07, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles ist also 100/7 = 14,3 mal so groß für Erlenholz als für Luft.

Antwort. Wenn eine offene Pfeife von l m Länge den nämlichen Ton gibt wie ein Stab von l_1 m Länge, so verhalten sich die Geschwindigkeiten des Schalles in beiden, d. h. in der Luft und der festen Substanz des Stabes wie $l : l_1$. (Siehe Erkl. 777.)

Frage 844. Auf welchem Wege versuchte Biot die Schallgeschwindigkeit im Gußeisen zu bestimmen?

Erkl. 778. Die von Biot benutzte Röhrenleitung bestand aus 376 einzelnen Röhren, welche durch Bleiringe verbunden und die letzteren mit geteertem Stoffe überzogen waren.

Antwort. Biot bestimmte die Schallgeschwindigkeit im Gußeisen mit Hilfe einer 951¼ m langen Röhrenleitung. Ein an dem einen Ende aufgestellter Hammer schlug gleichzeitig auf die Röhrenwand und auf eine an der Leitungsöffnung aufgehängte Glocke. Der am anderen Ende stehende Beobachter

Im Jahre 1851 stellten Wertheim und Breguet analoge Versuche mit den Telegraphendrähten der Versailler Eisenbahn auf eine Weglänge von 4067 m an, um genau die Zeitdauer für die Uebertragung eines Tones zu bestimmen, der von einem zu bestimmter Zeit auf einen Endpfahl ausgeführten Hammerschlage herrührte. Dabei wurde aber beobachtet, dass der Schall einen vorhandenen Tunnel nicht zu durchsetzen vermochte, trotzdem der isolierte Draht die Wandung nirgends berührte. Die bei diesen Versuchen ermittelte Geschwindigkeit von 3485 m gilt demnach wahrscheinlich für den zwischen beiden Stationen befindlichen Erdboden.

vernahm nacheinander zwei Töne, von denen der eine durch das Gusseisen, der andere durch die Luft übertragen worden war. Die Zeit, welche zwischen diesen beiden Wahrnehmungen verfloß, wurde mit einem Chronometer ermittelt. Aber die geringe Dauer derselben, (2,5 Sekunden) sowie die ungleichmäßige Wandung ließen kein sehr genaues Resultat erwarten. (Siehe Erkl. 778.) Biot fand auf diese Weise, dass die Schallgeschwindigkeit im Gusseisen ungefähr 10,5 mal so groß ist, als in der Luft.

Frage 845. Warum gilt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, wie wir sie soeben bestimmten, nur für *stabförmige* feste Körper, aber nicht für solche, welche nach allen Richtungen des Raumes wesentliche Ausdehnungen haben?

Erkl. 779. Die Fortpflanzung des Schalles durch einen festen Körper hängt bis zu einem gewissen Grade von der Anordnung seiner Moleküle ab. Ist der Körper homogen (gleichartig) und strukturlos, so wird der Schall nach allen Richtungen gleich schnell fortgepflanzt; dies ist aber nicht der Fall bei Körpern, welche, wie in der anorganischen Natur die Kristalle, in der organischen die Bäume, eine bestimmte Struktur (inneres Gefüge) besitzen. Dasselbe gilt auch für andere Erscheinungen als die des Schalles. So wird z. B. die Wärme durch das Holz in verschiedenen Richtungen ungleich schnell geleitet. Die Leitungsfähigkeit ist am größten in der Richtung der Fasern; und sie geht leichter radial durch die Holzschichten als tangential.

Antwort. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Erschütterung in einem Stabe, der sich in transversaler Richtung frei zusammenziehen und ausdehnen kann, während er sich in longitudinaler Richtung verlängert oder verkürzt, ist eine andere wie diejenige in einer festen Masse, wo die Möglichkeit einer solchen freien seitlichen Bewegung nicht besteht und die Spannungen an den beiden Grundflächen eines beliebig aus der Masse herausgeschnittenen Zylinders anderen Gesetzen gehorchen.

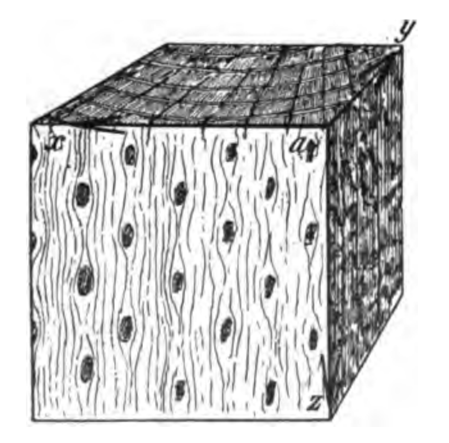
Aus Wertheims Untersuchungen folgt, dass die Schallgeschwindigkeit in einem Stabe sich zu der in einer relativ unbegrenzten Masse von derselben Substanz verhält, wie $1 : \sqrt{3/2}$ oder wie $\sqrt{2} : \sqrt{3}$.

Frage 846. Was können wir beobachten, wenn wir einen Holzwürfel nach seinen drei zueinander senkrecht stehenden Achsen in bezug auf die Schallgeschwindigkeit untersuchen?

Erkl. 780. Geschwindigkeit des Schalles in Holz.

Holzart	der Länge nach	radial	tangential
Akazie	4719 m	1476 m	1353 m
Kiefer	3363 „	1337 „	784 „
Birke	3344 „	1831 „	1416 „
Eiche	3850 „	1571 „	1119 „
Tanne	3324 „	1406 „	794 „
Ulme	4121 „	1423 „	1014 „
Sykomore	4464 „	1500 „	1137 „
Esche	4694 „	1393 „	1264 „
Erle	4670 „	1369 „	1044 „
Espe	5085 „	1616 „	911 „
Ahorn	4100 „	1539 „	1037 „
Pappel	4285 „	1404 „	1051 „

Fig. 435.



Antwort. Schneiden wir einen Würfel nahe der Rinde aus dem Holze eines gut gewachsenen Baumes, wo die Jahresringe auf einer kurzen Strecke als gerade und einander parallel angesehen werden können, so ist die Geschwindigkeit des Schalles in der Längsrichtung der Fasern, also in der Richtung az (siehe Fig. 435) am größten, während sie in radialer Richtung, oder senkrecht zu den Ringen, d. h. in der Richtung ay schon wesentlich geringer ist, und am kleinsten wird sie in der tangentialen Richtung ax. Das Holz besitzt also drei ungleiche Achsen der Schallleitung, welche mit den Elastizitätsachsen desselben zusammenfallen. (Siehe Seite 23 unseres Lehrbuchs der Elastizität und Festigkeit.) Die elastische Kraft in der Richtung der Fasern übertrifft oft 10 mal diejenige senkrecht zu denselben und wird am kleinsten nach der tangentialen Richtung. Da nun, wie wir schon des öfteren erwähnt haben, die Schallgeschwindigkeit der Quadratwurzel aus dem Elastizitätsmodulus direkt proportional ist, so erklärt sich hieraus die verschiedene Geschwindigkeit des Schalles in der Richtung der verschiedenen Achsen. Wertheim und Chevandier haben die Schallgeschwindigkeit in der Richtung dieser drei Achsen bestimmt, und die Resultate erhalten, welche die nebenstehende Tabelle enthält.

Frage 847. Welchen Einfluss hat eine Temperaturzunahme auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in den Metallen?

Antwort. Als allgemeine Regel gilt, dass die Geschwindigkeit des Schalles durch die Metalle bei zunehmender Temperatur abnimmt; indes macht das Eisen innerhalb gewisser Temperaturgrenzen eine auffallende Ausnahme von der Regel. Während z. B. bei einer

Erkl. 781. Geschwindigkeit des Schalles in Metallen.

Name des Metalles	bei 20° C	bei 100° C	bei 200° C
Blei . . .	1229 m	1205 m	— m
Gold . . .	1744 „	1724 „	1736 „
Silber . .	3285 „	2640 „	2475 „
Kupfer . .	3558 „	3295 „	2950 „
Platin . .	2688 „	2573 „	2463 „
Eisen . .	5033 „	5301 „	4687 „
Eisendraht (gewöhnlicher)	4908 „	5101 „	— „
Gussstahl	4989 „	4925 „	4789 „
Stahldraht (englischer)	4719 „	5246 „	5000 „
Stahldraht	4088 „	5017 „	— „

Temperaturerhöhung von 20° bis 100° C beim Kupfer die Geschwindigkeit von 3558 auf 3295 m fällt, bedingt dieselbe Erhöhung beim Eisen eine Zunahme der Geschwindigkeit von 5033 auf 5301 m. Zwischen 100° und 200° sehen wir indessen, dass die Geschwindigkeit im Eisen von der letzteren Zahl auf 4687 fällt. Daher wird im Eisen bis zu einer gewissen Grenze die Elastizität durch Erwärmung vermehrt; jenseits dieser Grenze sinkt sie.

Frage 848. Welche Methode eignet sich ganz vorzüglich zur Vergleichung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern mit derjenigen in der Luft?

Erkl. 782. Drei Versuche, bei denen ein Messingstab von 941,5 mm Länge angewandt wurde, ergaben für die durchschnittliche Wellenlänge in dem Rohre 43,30; daraus folgt $c = 10{,}87$. Für Stahlstäbe erhielt Kundt $c = 15{,}345$; für einen Glasstab $c = 15{,}24$ und für einen Kupferdraht $c = 11{,}960$, Wüllner erhielt für Glas $c = 15{,}29$. Die Zahlen stimmen mit denen von Wertheim und den für dieselben Substanzen theoretisch berechneten so vortrefflich, dass die Genauigkeit der Methode dadurch unzweifelhaft bewiesen wird.

Antwort. Wie wir bereits in Antwort auf Frage 819 dargetan haben, eignet sich hierzu ganz vorzüglich die Methode von Kundt. Die Länge eines in der Mitte befestigten Stabes entspricht der Länge einer stehenden Welle, während uns die Länge der in dem bestäubten Rohre vorhandenen Welle die Länge der stehenden Welle von genau derselben Schwingungsdauer in der Luft gibt. Ist c die Schallgeschwindigkeit im Stabe von der Länge l und n seine Schwingungszahl, so ist $c = 2ln$. Ist c_1 die Schallgeschwindigkeit in der Luft, l_1 die Länge der in dem Glasrohre gemessenen Welle, so ist $c_1 = 2l_1n$, und somit $c/c_1 = l/l_1$ (gleichwie in Antwort auf Frage 842), d. h., das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten ist gleich dem der Stablänge und der in dem Glasrohre gemessenen Wellenlänge.

Frage 849. Auf welche Weise ist es Stefan (1866) gelungen, die Schallgeschwindigkeit für weiche Körper (Kautschuk, Wachs u. dergl.) zu bestimmen, welche nicht

Antwort. Stefan brachte solche Körper, wie z. B. Wachs in Stabform mit einem Glas- oder Holzstabe in Verbindung, wel-

durch Anstreichen zum Tönen gebracht werden können?

Erkl. 783. Zu demselben Zwecke versetzte Warburg einen Stab des zu untersuchenden Materials durch einen andern, für welchen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bekannt ist, in isochrone transversale Schwingungen, wonach man durch Aufsuchen der Knotenpunkte auf beiden Stäben die Längen ihrer schwingenden Abteilungen vergleichen konnte.

Melde verfertigte (1892) lange, breite Streifen von allen Sorten von Membranen, gab ihnen eine solche Länge und Spannung, dass sie mit dem behandschuhten, kolophoniumbedeckten Daumen und Mittelfinger gerieben, ihren Grundton rein ergaben, bestimmte die Schwingungszahl desselben und berechnete daraus die Schallgeschwindigkeit; für Seidenpapier 2700 m, für Pergamentpapier 2300 m und für Karton 2500 m; für Leinenband 1900 m, für Baumwollband 1400 m, für Atlasband 2000 m, für Seidenband 1200 m, für Ripsband 700 m, für Leinwand 3000 m, für dünne Holzstreifen 4000 m, für Leder 400 m, für Pergament 1800 m, für Magnesiumband 4600 m.

cher durch Reiben in tönende Schwingungen versetzt werden konnte, so dass der Wachsstab eine Verlängerung des Holzstabes bildete. Das System dieser beiden so verbundenen Stäbe liefert, wenn man den Glasstab reibt, einen Longitudinalton von besonderer Klangfarbe, dessen Tonhöhe sich bestimmen läßt. Aus der Tonhöhe des isoliert schwingenden Glasstabes und der Aenderung der Tonhöhe, wenn an dem Glasstabe der Wachsstab sitzt, sowie aus der bekannten Länge und dem Gewichte des Wachsstabes läßt sich dann die Schallgeschwindigkeit in dem Wachsstabe berechnen. So ergab sich für Wachs bei 20° 730 m Geschwindigkeit, welche bei jedem Grade steigender Temperatur um 40 m abnahm; für Unschlitt 460 m, für Kautschuk 30 bis 60 m.

D. Die Stärke oder Intensität des Schalles bei seiner Fortpflanzung durch die atmosphärische Luft.

a) Umstände, von denen die Schallintensität abhängig ist.

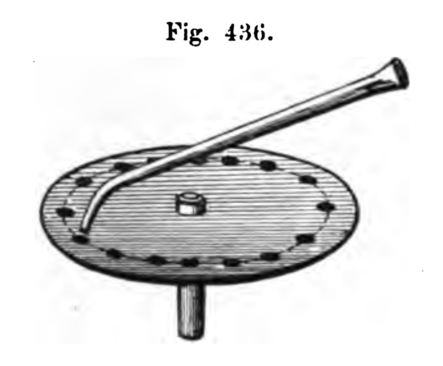
α) Größe des schallenden Körpers.

Frage 850. Von welchem Einflusse ist zunächst die Größe des schallenden Körpers auf die Stärke des Schalles?

Antwort. Je größer die Masse des schallenden Körpers und je größer die Fläche dieses Körpers ist, welche bei den Schwingungen die damit in Berührung stehende Luft erschüttert, desto stärker werden auch diese Schwingungen der Luft mitgeteilt, d. h. je größer die Zahl der gleichzeitig bewegten Mediumteilchen ist, desto stärker ist der Schall.

Frage 851. Durch welche Versuche läßt sich die Richtigkeit der vorstehenden Behauptung beweisen?

Fig. 436.



Erkl. 784. Hierher gehörige Erscheinungen aus dem alltäglichen Leben sind die folgenden: Ein schwerer Hammer gibt bei derselben Fallhöhe einen stärkeren Schall als ein leichter Hammer. Ein Kanonenschuß klingt viel intensiver als ein Pistolenschuß, die Lokomotivpfeife klingt stärker als die Pfeife des Zugführers und die Turmglocke stärker als die Tischglocke.

Aehnliche Unterschiede bestehen zwischen dem Knall eines Zündhütchens und dem einer Dynamitpatrone, oder zwischen dem Knistern des Funkens der Elektrisiermaschine und dem Donner des Blitzschlags; zwischen dem Rauschen des Wassers aus der Dachrinne und dem Tosen des Wasserfalls; zwischen dem Geräusche eines fallenden Schneeballs und dem Brausen einer herabstürzenden Lawine, usw.

Antwort. Wenn wir beim Anblasen einer Scheibensirene (Fig. 436) statt e i n e s Blaserohrs deren z w e i anwenden, und damit zugleich zwei Löcher anblasen, so erhalten wir beim Drehen der Scheibe einen doppelten Impuls, wodurch die Stärke des Schalles vermehrt wird; und blasen wir statt zweier Löcher gleichzeitig 10 an, so erzeugen wir einen weit stärkeren Ton als bei Benutzung einer Röhre.

Wenn eine frei in der Luft ausgespannte Saite in Schwingungen versetzt wird, so gibt sie einen nur sehr schwachen Ton von sich; spannen wir dagegen die Saite auf einen Resonanzboden, so wird der Ton wesentlich stärker zu hören sein. Die Saite allein kann nur einer geringen Luftmenge Bewegung mitteilen, klingt daher für sich allein sehr schwach; wird aber ihre Bewegung (wie bei allen Saiteninstrumenten) auf einen Körper mit großen Oberflächen übertragen, so versetzt dieser eine große Luftmenge in Schwingungen und der Schall wird stark.

Eine Stimmgabel klingt weit stärker, wenn man dieselbe auf eine Holzfläche oder gar auf einen Holzkasten stützt, welche durch den Stiel in Schwingungen versetzt werden und dann ihrerseits eine ausgedehnte Luftmasse vor sich hertreiben.

Frage 852. Welches bekannten Mittels bedient man sich, um einen weit entfernten Schall, z. B. das Herannahen eines Eisenbahnzuges, deutlicher zu hören?

Erkl. 785. Die Kanonade von Florenz wurde bis über Livorno hinaus, d. h. auf 90 km gehört. Bei der Belagerung von Genua hörte man die Geschütze über

Antwort. Ein gewöhnliches Mittel, um einen sehr entfernten Schall deutlicher zu hören ist, dass man sich mit dem Ohre dicht an die Erde legt, wovon im Felde öfters Gebrauch gemacht wird. Die Ursache, warum auf diese Art z. B. eine entfernte Kanonade

das Meer hin auf 165 km. Im Jahre 1792 wurde die Kanonade von Mainz auf der Hube bei Einbeck, etwa 240 km weit sehr deutlich gehört; am 4. Dezember 1832 wurde die Kanonade von Antwerpen im sächsischen Erzgebirge, also 600 km weit verspürt. Am 1. Februar 1901 zwischen 3 und 4 Uhr nachmittags, als die Leiche der Königin Viktoria von Cowes nach Portsmouth übergeführt wurde, sind die Salutschüsse der Kriegsschiffe, an denen die Königl. Jacht vorüberfuhr, an zahlreichen, weit von Spithead entfernt gelegenen Punkten sehr deutlich gehört worden, und zwar u. a. gegen Osten hin auf 134 km.

oder der Marsch einer Armee oder das Fahren der Geschütze über eine Brücke in einer sonst ungewöhnlichen Entfernung hörbar ist, liegt darin, dass die Oberfläche der Erde ringsumher etwas mit erschüttert wird und also gewissermaßen als Resonanzboden dient. Eine solche Erschütterung der Erdoberfläche ist unter manchen Umständen, selbst in sehr fest gebauten Häusern, z. B. bei schnellem Vorüberfahren eines schweren Wagens, bisweilen nicht nur hörbar, sondern auch fühlbar.

β) Schwingungsweite.

Frage 853. Wir kommen nun zu einem zweiten Faktor, von welchem die Intensität des Schalles abhängig ist, und den wir zur Anwendung bringen, wenn wir ein Musikinstrument „forte“ spielen wollen; welcher Faktor ist das?

Erkl. 786. Wir wissen aus unserer Erfahrung, dass, wenn eine bestimmte Taste des Klaviers einmal schwächer, einmal stärker angeschlagen, oder derselbe Ton auf der Geige einmal schwächer, einmal wieder stärker angestrichen wird, oder wir in ähnlicher Weise mit einer Zither, mit Blasinstrumenten oder mit unserer Stimme verfahren, der Ton schwächer oder stärker zu hören ist, ohne dass sich dabei seine Höhe ändert. Mit Versuchen an der Sirene kann man zeigen (siehe Antwort 850), dass der Ton um so stärker wird, je mehr Löcher angeblasen werden, je größer also die Arbeit ist, und Vierordt's Versuche (1878) mit Metallkugeln, die aus verschiedenen Höhen auf Platten fielen, zeigten, dass der hierdurch entstehende Schall der Wurzel aus der Fallhöhe proportional ist.

Antwort. Die Stärke des Schalles ist von der Weite der Schwingungen des schallenden Körpers abhängig, und ist um so größer, je größer die zur Schallerzeugung angewendete mechanische Arbeit ist, die sich bei dieser Erregung in Schwingungen verwandelt. Je weitere Wege die Moleküle des tönenden Körpers zurücklegen, desto mehr werden die Luftteile, welche mit denselben in Berührung stehen, und mithin auch alle übrigen aus ihrer natürlichen Lage verrückt. Die Moleküle drängen sich in der Verdichtung enger aneinander und bilden demnach in den Verdünnungen größere Abstände unter sich, wodurch die Impulse auf das Gehör vermöge der größeren Druckdifferenzen stärker werden müssen, weil sie das Trommelfell in kräftigere Schwingungen versetzen.

Frage 854. Durch welchen einfachen Versuch können wir das vorstehende Gesetz beweisen?

Antwort. Wenn wir eine ziemlich lange Saite kräftig anschlagen, so sind anfangs ihre Schwingungen so weit, dass wir sie deutlich sehen können; dementsprechend ist ihr Ton anfangs am stärksten. Dann werden die sichtbaren Schwingungen immer kleiner, und in gleichem Maße nimmt die Stärke des Tones ab, ohne dass sich die Tonhöhe ändert. Damit ist zugleich bewiesen, dass die Schallsphären, gleichviel ob die Impulse stärker oder schwächer sind, die gleichen Abstände einhalten, und in diesen der Tonhöhe entsprechenden Zeitabständen an unser Ohr gelangen.

Erkl. 787. Gleiche Beobachtungen können wir an gestrichenen Saiten, an den Zungen der Zungenpfeifen und vielen anderen tönenden Körpern machen. Die gleiche Folgerung müssen wir aus der Tatsache ziehen, dass die Stärke des Tones abnimmt, wenn wir uns im Freien von dem tönenden Körper entfernen, während die Tonhöhe unverändert bleibt. Mit der Entfernung ändert sich aber an den Luftwellen nur die Schwingungsweite der einzelnen Luftteilchen. Von dieser muß also die Stärke des Schalles abhängen.

Frage 855. Aus welchen Erscheinungen geht hervor, dass die Schwingungszahl von der Tonstärke nur innerhalb bestimmter Grenzen unabhängig ist, über welche hinaus die Tonhöhe beeinflußt wird?

Antwort. Sehr stark angeschlagene, gerissene oder gestrichene Saiten geben wegen der eintretenden Verlängerung im ersten Momente einen tieferen Ton, ebenso Zungen, deren Schwingungen durch einen übermäßigen Luftwiderstand verlangsamt werden. So sind auch die Schwingungen eines Pendels nur bis zu einem gewissen Elongationswinkel isochron.

Erkl. 788. Auch Membranen, Platten und Stäbe können durch Erregung größerer Amplituden im Tone momentan vertieft werden. Der umgekehrte Fall tritt bei Luftsäulen in Pfeifen ein, die durch stärkeres Anblasen höher werden, aus Gründen, die wir im II. Bande der Akustik kennen lernten.

γ) Schwingungszahl.

Frage 856. Wir haben soeben gelernt, dass bei gleich hohen Tönen von verschiedener Schwingungsweite derjenige stärker klingt, welchem die größere Amplitude zukommt; welche Erscheinung zeigt sich nun, wenn wir verschieden hohe Töne von gleicher Amplitude erklingen lassen, und welches Gesetz folgt daraus?

Antwort. Hohe Töne von gleicher Amplitude klingen viel stärker als tiefe, folglich ist die Schallintensität auch von der Zahl der Schwingungen abhängig. Es wird nämlich, wenn schnellere oder langsamere Schwingungen so geschehen, dass

jede einzelne Schwingung die Luft mit derselben Kraft in Bewegung setzt, ein hoher Ton wegen der größeren Zahl in derselben Zeit erfolgenden Schwingungen mehr Wirkung auf das Gehör äußern, als ein tiefer Ton. Wenn nun beide gleiche Wirkung tun sollen, so müssen die Kräfte, welche jede einzelne Schwingung äußert, sich umgekehrt wie die Zahlen der Schwingungen verhalten. (Siehe Erkl. 789.)

Erkl. 789. Dieses und das vorige Gesetz faßt man auch in der Weise zusammen, dass man sagt: Die Stärke der Schallempfindung ist um so größer, je größer die zur Schallerzeugung aufgewandte mechanische Arbeit ist; diese Arbeit ist aber gleich der lebendigen Kraft der schwingenden Teilchen, welche durch das Quadrat der Schwingungsgeschwindigkeit und durch das Quadrat der Amplitude gemessen wird.

Dass die hohen Töne eines Klaviers bei gleicher Kraft des Anschlags im allgemeinen schwächer klingen, als die tiefen Töne, das hat seinen Grund zunächst in der geringeren Masse der oberen Saiten, zugleich wird aber auch die Amplitude der kürzeren Saiten geringer sein, als die der längeren, sowohl infolge der geringeren Länge, als auch infolge der stärkeren Spannung.

δ) Beschaffenheit des Mediums.

Frage 857. Von welchem Einflusse ist die Beschaffenheit des Mediums, in welchem der Schall entsteht und in welchem er sich fortpflanzt, auf die Schallintensität?

Antwort. Je dichter, elastischer und gleichartiger dieses Medium ist, um so stärker ist der Schall. Je dichter die Luft ist, um so besser pflanzt sich der Schall in derselben fort; je dünner die Luft ist, um so schlechter pflanzt sich der Schall in derselben fort, und durch den luftleeren Raum pflanzt sich der Schall nicht fort, denn der Schall besteht aus pendelartigen Schwingungen elastischer Körper, und so erfordert auch seine Fortpflanzung das Vorhandensein solcher Körper; je dichter dieselben sind, um so mehr Masse wird in Schwingungen versetzt, die sich zu unserem Ohre hin fortpflanzen. (Siehe Seite 103 u. f. im I. Bande der Akustik.) Der Schall ist demnach am stärksten bei

Erkl. 790. Der größte Lärm auf der Erde kann sich nicht über die Grenzen unserer Atmosphäre verbreiten, dagegen kann aber auch von keinem anderen Himmelskörper nur das mindeste Geräusch bis zu unserer Erde dringen; die furchtbarsten Explosionen könnten auf dem Monde stattfinden, ohne dass wir davon etwas hörten. Saussure sagt, dass auf dem Gipfel des Montblanc ein Pistolenschuß weniger Geräusch macht, als ein kleines Taschenterzerol in der Ebene, und Gay-Lussac fand mit seinem Ballon in einer Höhe von 7000 m, also in einer sehr verdünnten Luft schwebend, dass die Intensität seiner Stimme ungemein abgenommen hatte. Um so merkwürdiger ist das starke Getöse,

welches in enormen Höhen explodierende Feuerkugeln erzeugen. Der Schall, welchen das 1719 in 105 km Höhe (nach Halley's Messung) zerplatzende Meteor erzeugte, glich dem einer Kanone von schwerem Kaliber und machte Türen und Fenster erzittern, so dass ein Fernrohr auf der Sternwarte zu Greenwich aus seiner Nische stürzte.

hohem Barometerstande, bei heiterer, dampf- und dunstfreier Luft und bei niedriger Temperatur.

Frage 858. Durch welche, mit Wasserstoffgas ausgeführten Versuche fand das vorstehende Gesetz seine Bestätigung?

Erkl. 791. Befindet sich eine Schallquelle in einem offenen Gefäße, dessen Luft wir stark erwärmen, so wird der Schall schwächer, befindet sich dagegen die Schallquelle in einem geschlossenen Gefäße, dessen Luft durch eine Verdichtungspumpe oder durch Blasebälge stark zusammengepreßt wird, so klingt dann der Schall beträchtlich stärker, als unter gewöhnlichen Umständen.

Wird die Luft durch die Sonne und die Bodenstrahlung ungleichmäßig erwärmt, so daß Schichten von ungleicher Dichtigkeit sich übereinander lagern, so verliert der Schall darin etwas von seiner Stärke und trägt nicht so weit als in einer homogenen Atmosphäre; die Luft wird in akustischer Beziehung gleichsam trübe. (Siehe auch Antwort 859.)

Antwort. Priestley ließ ein Schlagwerk unter einer mit Wasserstoff gefüllten Glasglocke tönen und fand, dass der Schall fast unhörbar wurde; das spezifische Gewicht des Wasserstoffs ist aber 1/14 von dem der atmosphärischen Luft, indem ein Liter Wasserstoff nur 0,0896 *g*, dagegen 1 *l* atmosphärischer Luft 1,293 *g* wiegt. Pilâtre de Rozier atmete, als er seinen Luftballon mit Wasserstoff füllte, große Mengen dieses Gases ein und bemerkte, dass seine Stimme dadurch ganz schwach und näselnd wurde. Maunoir und Paul haben dieselbe Erfahrung in Genf gemacht; nach ihrer Angabe waren ihre Stimmen erschrecklich dünn und fistelnd geworden.

Frage 859. Aus welchen, bei Hochöfen und Wasserbauten gemachten Erfahrungen geht hervor, dass der Schall in komprimierter Luft sehr verstärkt wird und das Gehör weit lebhafter als sonst erregt?

Erkl. 792. Von Zach bemerkte auf der isoliert und hoch liegenden Sternwarte Seeberg bei Gotha, dass bei heiterer, ruhiger und nicht feuchter Luft, wenn die Sterne mit gleichmäßiger, nicht schwankender Bewegung durch das Feld seines Passageninstrumentes gingen, die Glocken der umliegenden

Antwort. John Roebuck hat dies zuerst im Gebläsekasten des Hochofens zu Devonshire bemerkt. Später hat man dieselbe Erscheinung bei Taucherglocken und Wasserbauten, wo die Arbeiter sich in eisernen, mit verdichteter Luft gefüllten Röhren aufhielten, beobachtet. Als man die Pfeiler der Brücke zu Arceuil baute, fand es sich, dass in den Röhren alle Töne einen metallischen, gehirnerschütternden Klang hatten; während man sprach, fühlte man im

Kirchtürme, das Geräusch der Mühlen, das Bellen der Hunde und Rufen der Nachtwächter ausnehmend deutlich und stark gehört wurden, statt dass alle diese Schalle gar nicht oder nur dumpf wahrnehmbar waren, wenn die Sterne zitterten. Die Bewohner der Alpen und der Anden halten die Verstärkung des Schalles während einer ruhigen Nacht für ein Vorzeichen naher Wetterveränderung, ebenso wie das helle Blinkern der Sterne.

Ein sehr auffallendes Beispiel der Stärke, womit der Schall bei hohen Kältegraden fortgepflanzt wird, liefert die Beobachtung von Foster (1826), welcher sich zu Port Bowen bei — 28° C mit einem 2040 m weit entfernten Manne sehr gut unterhalten konnte, wobei jedoch die in jenen öden Gegenden herrschende Stille nicht ohne Einfluß war.

Schädel ein Dröhnen, wie in einer Trompete. Eine andere, nicht weniger unangenehme Wirkung der verdichteten Luft bestand in dem Drucke, den dieselbe auf die Lippen ausübte; man stammelte beim Sprechen, und keiner vermochte zu pfeifen. Zusammenhängend hiermit ist die Beobachtung von Hawksbee, dass der Schall eines Weckers unter dem Rezipienten der Luftpumpe um so schwächer wurde, je stärker er evakuierte. (S. 105 I. Bd. d. Akustik.)

Frage 860. Welcher Unterschied ist wahrnehmbar, wenn der Schall in der Luft sich aufwärts oder abwärts fortpflanzt?

Erkl. 793. Bei der Erklärung der nebenstehenden Tatsache darf nicht übersehen werden, dass dieselbe Schallquelle in der dünnen Luft hoher Berge nicht so intensiv wirken kann, als in der dichten Luft am Meeresspiegel, und dass überdies die Wellenbewegung der dünneren Luft sich auf die unteren dichteren Luftschichten nicht so leicht überträgt, wie umgekehrt; gleichwie eine bewegte leichtere Kugel, gegen eine schwere stoßend, die letztere nicht in so lebhafte Bewegung versetzt, als wenn eine schwerere rollende Kugel gegen eine leichtere trifft.

Antwort. Im allgemeinen darf man annehmen, dass sich der Schall leichter nach oben als nach unten fortpflanzt, wobei er ebenfalls Schichten von ungleicher Dichtigkeit durchläuft. Aus Erfahrungen die Saussure und Schultes hierüber gemacht haben, geht hervor, dass der Schall sehr leicht auf weite Strecken vom Fuße bis zur Spitze hoher Berge gelangt, in entgegengesetzter Richtung aber ausbleibt. 1816 wurden die Explosionen des Vulkans St. Vincent bis Demerary, d. h. auf 75 geographische Meilen gehört, und am 4. Dezember 1832 hörte man die Kanonade von Antwerpen im sächsischen Erzgebirge, also bis 80 geog. Meilen weit.

ε) Richtung des Windes.

Frage 861. Von welchem Einflusse ist die Richtung des Windes auf die Intensität des Schalles?

Antwort. Es ist eine allgemein bekannte Erscheinung, dass die Intensität des Schalles bei seiner

Fortpflanzung durch die Luft sich unter dem Einflusse des Windes oft ganz erheblich ändert, so dass die Töne entfernter Tonquellen, z. B. einer Turmglocke oder einer Signalpfeife in der Richtung des Windes viel stärker zu hören sind als gegen den Wind. So wurde z. B. nach Meikle das Auffliegen der Stobbs-Pulvermühle 1824 mit dem Winde auf 30 englische Meilen, gegen den Wind aber kaum 3 Meilen weit gehört. Bei Versuchen, welche Haldat zu diesem Zwecke mit einer tönenden Glocke im Freien anstellte, verhielt sich die Entfernung, bis zu welcher der Schall über dem Winde gehört wurde, zu der, wohin er unter dem Winde gelangte, wie 1 : 2 oder auch wie 1 : 3; ebenso stark war das Verhältnis bei diagonaler Richtung des Windes gegen die des Schalles, bei lotrechter aber zeigte sich gar kein Unterschied. De la Roche und Dünal fanden bei ihren Versuchen, dass der Wind auf die Stärke des Schalles innerhalb eines Abstandes von 6 m gar keinen Einfluß hat. Dagegen zeigt sich derselbe sehr bedeutend, sobald die Entfernung größer wird, und wächst mit der Zunahme von dieser, jedoch so, dass ein entgegenwehender Wind die Fortpflanzung des Schalles ausnehmend hindert, ein in seiner Richtung liegender aber sie gar nicht befördert, denn bei ruhiger Luft, oder wenn der Wind lotrecht auf die Richtung des Schalles stößt, geht derselbe weiter, als mit dem Winde.

Erkl. 794. In bezug auf den Einfluß des Windes auf die Geschwindigkeit des Schalles nimmt man naturgemäß an, dass der Schall sich um so viel geschwinder oder langsamer bewegt, als die Geschwindigkeit des Windes beträgt. Schon die Mitglieder der Pariser Akademie wollten gefunden haben, dass der Wind auf den Schall ohne Einfluß ist, wenn die Richtungen beider aufeinander senkrecht stehen, dass dagegen die Geschwindigkeiten beider addiert oder subtrahiert werden müssen, wenn sie zusammenfallen oder einander entgegengesetzt gerichtet sind. Delaroche bemerkt, dass es eine mißliche Sache sei, die Geschwindigkeit des Windes zu der des Schalles zu addieren oder beide Größen voneinander abzuziehen, da die Schallwellen bei ihrer ungleich größeren Geschwindigkeit dem Winde bald vorauseilen müßten, da letzterer schon sehr stark sein muß, wenn er 13 m in der Sekunde durchläuft. Arago bemerkt dazu, dass der Wind nicht stets gleichmäßig, sondern stoßweise weht und man daher nicht wissen kann, mit welcher von diesen Bewegungen die Schallfortpflanzung zusammenfällt. Eine eingehende Erklärung über den Einfluß des Windes auf die Intensität des Schalles gab Stokes (siehe Nebelsignale).

ꝗ) Unterschied bei Tage und bei Nacht.

Frage 862. Welche Erscheinungen beweisen, dass der Schall bei Nacht ungleich stärker zu hören ist als bei

Antwort. Auffallend zeigt sich die Intensität des Schalles bei Nacht bei den Fußtritten gehender

Tage, und wie erklärt sich dieser Umstand?

Erkl. 795. Am vollständigsten hat A. v. Humboldt diesen Gegenstand untersucht, und dabei die zahlreichen Erfahrungen benutzt, die sich ihm auf seinen weiten Reisen darboten. Entgegen der nebenstehenden ersten Ursache ist in den Tropenländern der Lärm der Tiere bei Nacht weit stärker als bei Tage, und der Wind erhebt sich stets erst nach Sonnenuntergang. Dennoch erschien das Getöse der Wasserfälle des Orinoco, auf mehr als eine halbe Meile Entfernung bei Nacht dreimal so stark als am Tage, und dasselbe zeigte sich hinsichtlich des Getöses der Vulkane. Humboldt hat außerdem bemerkt, dass der Schall bei Nacht mehr in der Ebene, als auf Bergen von etwa 3000 m Höhe, mehr auf dem Lande als auf der See verstärkt wird.

Erkl. 796. Wie Tyndall und Henry nachgewiesen haben, ist das ungleiche Brechungsvermögen der verschiedenen Schichten der Atmosphäre von großem Einflusse auf die Intensität des Schalles, der sich durch die Schichten hindurch fortpflanzt. Sowohl Temperaturdifferenzen als Unterschiede in der Feuchtigkeit können sich hierbei geltend machen, da durch beide Umstände die Dichtigkeit und daher auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit beeinflußt wird. Durch Versuche von Tyndall ist bewiesen, dass Gasschichten von verschiedener Dichte den Schall merklich zurückhalten. (S. Nebelsignale.)

Personen, hauptsächlich aber beim Nagen der Mäuse, was bei Nacht weit lauter zu hören ist als bei Tage. Nicholson führt als Beispiel an, dass man auf der Westminsterbrücke die Stimmen der Arbeiter in einer 4500 m entfernten Fabrik und das Rufen der Schildwachen von Portsmouth 6000 bis 7500 m weit bei Nacht deutlich hören kann.

Die Verstärkung des Schalles während der Nacht hat ihre Ursachen

1) in der Empfindlichkeit des Ohres. Bei Nacht fallen die vielen Geräusche fort, welche die Atmosphäre während des Tages in beständiger Unruhe erhalten; das Ohr ist aber um so empfindlicher, je weniger es durch andere Geräusche abgestumpft ist. Gleichwie man bei Tage die Sterne nicht sieht, so verschwinden durch das Tagesgeräusch die leiseren Töne, die man in der ruhigen Nacht deutlich hört.

2) Am Tage wechseln, wegen der Einwirkung der Sonnenstrahlen, beständig wärmere Luftschichten mit kälteren, wärmere steigen in kälteren auf und lagern sich über die letzteren, wodurch dann der Schall genötigt wird, aus dichteren Luftschichten in dünnere und umgekehrt überzugehen, was eine Schwächung desselben bedingt. Während der Nacht ist die Temperatur gleichmäßiger und in demselben Maße auch die Dichte der atmosphärischen Luft.

γ) Entfernung von der Schallquelle.

Frage 863. Welchen Einfluß hat die Entfernung des Ohres von der Schallquelle auf die Intensität des Schalles?

Erkl. 797. Das nebenstehende Gesetz, welchem auch alle Anziehungs- und Ab-

Antwort. Breiten sich die Wellen einer Schallquelle von kleinen Dimensionen nach allen Richtungen des Raumes hin aus, so gilt das Gesetz, dass das in jedem beliebigen Abstande von der

stoßungskräfte unterworfen sind, gilt nur unter der Voraussetzung, dass das ursprüngliche Arbeitsvermögen auf dem zurückgelegten Wege weder teilweise aufgezehrt, noch durch die den Schall leitende Materie teilweise verschluckt und in eine andere Energieform, z. B. in Wärme, umgesetzt wird.

Allard fand (1882) durch Versuche, dass der Schall noch stärker als im quadratischen Verhältnisse der Entfernung abnimmt; er erklärte diese Erscheinung durch Reflexion und Zerstreuung in der Luft selbst und nahm einen Durchlässigkeitskoeffizienten b an, d. h. den Bruchteil der Schallintensität, welchen eine Luftschicht von 1 km Dicke durchläßt, den er im Mittel gleich 0,473 findet. Doch ist derselbe sehr schwankend, wie die Tatsache beweist, dass die Tragweite des Nebelhorns zwischen 2 bis 20 Seemeilen beträgt. Hohe Töne haben bei gleicher Arbeit eine geringere Tragfähigkeit und bei schwächeren Tönen ist die Abnahme besonders stark. Mit dem Winde (unter 10 m Geschwindigkeit) ist die Tragweite 3-mal so groß als gegen denselben.

Schallquelle durch die Oberflächeneinheit hindurch gehende Arbeitsvermögen dem Quadrate jenes Abstandes umgekehrt proportional ist, oder mit andern Worten: Die Intensität des Schalles ist umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung von der Schallquelle.

Der theoretische Beweis ergibt sich aus folgender Betrachtung: Alle frei nach allen Seiten fortgehenden Wellenbewegungen, mögen sie nun Licht, Elektrizität, Wärme oder Schall sein, breiten sich auf konzentrischen Kugelflächen um ihre Quelle als Mittelpunkt aus. Da nun aber diese Kugelflächen wie die Quadrate ihrer Halbmesser wachsen, so muß die Intensität der vom Zentrum ausgehenden Wirkung in demselben Verhältnisse abnehmen, da sie sich auf immer größere Flächen verteilt. Hieraus folgt das obige Gesetz. (Siehe auch Seite 69, 1. Bd. der Akustik.)

Frage 864. In welcher Weise haben Delaroche und Dunal das vorstehende Gesetz nachgewiesen?

Erkl. 798. Im Jahre 1882 machte Vierordt bekannt, dass nach seinen Versuchen die Schallstärke im umgekehrten Verhältnisse zur Entfernung selbst steht. Bei einer Klasse von Versuchen benutzte er die Tragweite des Schalles, d. i. die Entfernung von der Schallquelle, in welcher die Schallstärke den Schwellenwert erreicht hat oder die Entfernung, bei deren Ueberschreitung der Schall unter die Schwelle der Empfindung schlüpft oder unhörbar wird. Es ergab sich, dass ein 2-, 3-, 4-mal so starker Schall die 2-, 3-, 4-fache Tragweite zeigte, während nach dem vorstehenden Gesetze die 4fache Schallstärke nur die doppelte Tragweite haben dürfte.

Antwort. Sie verschafften sich 5 ganz gleiche Uhrglocken und stellten davon eine an einem Endpunkte einer gemessenen Standlinie, die vier andern am entgegengesetzten Ende auf. Nun wurde der Punkt bestimmt, wo der Schall der einen Glocke ebenso laut erschien als der Ton der vier andern zusammengenommen. Bei gleicher Entfernung mußte der letztere offenbar viermal so stark als der erstere sein. Es fand sich, dass er nur noch ebenso stark erschien, also $\frac{1}{4}$ seiner ursprünglichen Intensität besaß, wenn der Beobachter ihn aus einer zwei mal so großen Distanz hörte, als den Ton der einzelnen Glocke. Dies war eine Bestätigung des erwähnten Gesetztes.

Frage 865. Worin bestanden die von Duff angestellten Versuche?

Antwort. Duff benutzte acht gleiche kleine Pfeifen, die durch einen gleich starken Luftstrom angeblasen werden konnten. Er ließ nun zunächst zwei Pfeifen ansprechen und bestimmte die kleinste Entfernung r, in welcher man sich aufstellen mußte, um den Ton nicht mehr zu hören; ebenso bestimmte er die Entfernung R, in welcher der Ton sämtlicher 8 Pfeifen verschwand. Es ergaben sich nun für die beiden Abstände bei verschiedenen Stärken dieser Tonquellen u. a. folgende einander zugehörige Werte:

r . . 384 . . 458 . . 597 m

R . . 506 . . 559 . . 712 m,

anstatt wie es nach dem obigen Gesetze sein müßte

R = 768 . . 916 . . 1194 m.

R war also stets kleiner als $2r$.

Erkl. 799. In einer andern Klasse von Versuchen wurden verschiedene Apparate so aufgestellt, dass sie gleich starke Schallempfindungen erregten; endlich wurde nachgewiesen, dass bei der Fortpflanzung des Schalles durch feste, flüssige und luftförmige Medien von gleichbleibendem Querschnitte durch die Längeneinheit immer dieselbe Schallschwächung erzeugt wird. Dies stimmt mit Beobachtungen von Neurenoeuf, der 1882 durch Versuche mit seiner konstanten empfindlichen Flamme fand, dass die Intensität des Tones einer am einen Ende von Messingröhren schlagenden Glocke am anderen Ende im umgekehrten Verhältnisse zur Röhrenlänge steht; außerdem steht sie im geraden Verhältnisse zur vierten Potenz der Röhrenweite und wächst mit der Dichte des Gases etwa in der Potenz $^4/_8$ derselben.

Frage 866. Welche andere Versuchsmethode hat Schafhäutl angegeben?

Antwort. Diese Methode beruht auf dem freien Falle von gleichen Kugeln aus verschiedener Höhe, und dem Vergleiche mit der Schallstärkeeinheit, die er Dynamie nennt, und wobei die Intensitäten zu- und abnehmen im Verhältnisse der Fallhöhe, multipliziert mit dem Gewichte des fallenden Körpers.

Erkl. 800. Nach M. v. Baumgarten (Wien) kann zur Messung der relativen Schallstärke der Aufschlag verschieden schwerer Hämmer dienen. Auch mittelst einer Reihe gleich hoher und konstant gleich starker Zungentöne (auf einer Windlade) läßt sich die relative Intensität verschiedener Tonquellen bestimmen.

Frage 867. Nach dem vorstehenden Gesetze hört das Ohr den Schall in der 10fachen Entfernung 100mal so schwach, als in der einfachen Entfernung; es geht also schon infolge der Entfernung eine große Klangmasse verloren; noch wesentlich größer ist aber der Schallverlust, wenn wir be-

Antwort. Angenommen, unser Ohr befindet sich von einer Schallquelle 1 m weit entfernt; die Oberfläche der zugehörigen Kugel beträgt demnach nach der Formel

$$F = 4r^2\pi$$

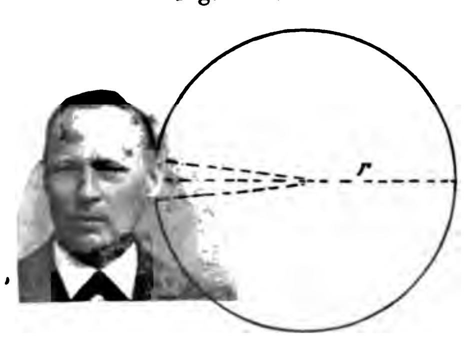
oder $F = 4 . 100^2\ 3{,}14$

oder $F = 125\,600$ qcm.

rücksichtigen, ein wie kleiner Teil der Schallstrahlen infolge der eigenartigen Ausbreitung in Kugelschalen das Ohr überhaupt nur trifft. Aus welcher Betrachtung ergibt sich der überaus geringe Bruchteil der das Ohr treffenden Schallmasse?

Da nun die Oberfläche der Ohrmuschel eines normalen Menschen 10 Quadratzentimeter beträgt, so gelangt bei der Entfernung von 1 m nur der 12 560ste Teil des Schallquantums der Schallkugel zu unserer Wahrnehmung, während der Rest verloren geht.

Fig. 437.



Frage 868. Der Schall verbreitet sich also rund um den schallenden Körper, jedoch ist er immer in welcher Richtung stärker?

Erkl. 801. Chladni bemerkt, dass eine gestrichene Scheibe stärker tönt, wenn sich das Ohr über derselben als mit ihr in einer Ebene befindet. Vorzüglich leicht und stark pflanzt sich der Schall über eine Wasserfläche fort, und auch der Erdboden (besonders, wenn er mit Steinen bepflastert ist), sowie Mauern und Wände haben einen entschiedenen Einfluß auf die Stärke der Schallfortpflanzung. Bei einer Kanonade kann man die hin- oder herwärts gehenden Schüsse durch das Gehör leicht unterscheiden, weil der Grad der Verdichtung der Luft, nach der Richtung, in welcher sie gestoßen wird, stärker als nach der andern ist.

Antwort. Der Schall ist immer in derjenigen Richtung stärker, in welcher die ursprünglich erzeugten Schallwellen fortgestoßen werden. Wir verstehen daher einen Redenden besser, wenn er uns mit dem Gesichte zugewandt, als wenn er abgewandt ist, besser, wenn er eine Wand, oder eine sonstige größere Fläche hinter sich hat, als wenn er nach allen Seiten frei steht. Daher befinden sich über den Rednerbühnen und Kanzeln Schalldeckel, gleichwie auch der, in der Mitte des Proszeniums am Theater auf dem Podium angebrachte Souffleurkasten die allseitige Ausbreitung des Schalles verhindern und infolge dessen dem Schauspieler eine größere Schallmasse zuführen soll.

Frage 869. Wie kommt es, dass die von der Schallquelle geradlinig ausgehenden und fort-

Antwort. Jedem Verdichtungsmoment folgt sein Verdünnungs-

schreitenden Schallstrahlen nicht nur von dem der Schallquelle zugewandten, sondern von dem abgewandten Ohre ebenfalls vernommen werden (wovon man sich durch das Schließen des andern Ohres überzeugen kann)?

Erkl. 802. Aus den vorhergehenden Erörterungen ergibt sich, dass wir bei gleichbleibender Intensität der Schallquelle stärkere Schalleindrücke auf zweifachem Wege erlangen können, einmal indem wir uns der Schallquelle nähern, oder diese uns näher bringen, und zum zweiten, wenn wir Mittel anwenden, durch welche möglichst viele Strahlen unserm Ohre zugeführt werden, dadurch, dass wir

a) die Gehörsfläche vergrößern (zum Beisp. dadurch, dass wir die Handfläche schalenförmig gekrümmt an die Ohrmuschel legen) oder b) dadurch, dass wir die seitliche Ausweichung der Schallstrahlen verhindern.

moment, in welchem die Rückschwingung der vorgestoßenen Moleküle stattfindet, so dass das Trommelfell des abgewandten Ohres von der rückschwingenden Schallwelle getroffen wird. Infolge des Beugungsvermögens des Schalles (s. S. 82, I. Bd.) wird das abgewandte Ohr aber auch von einem Teile der Verdichtungswelle erregt, und im geschlossenen Raume kommt dem abgewandten Ohre auch die Reflexion der Schallstrahlen von den Wänden zu Hilfe.

---

b) Schallröhren.

(Kommunikationsröhren, Sprachrohr und Höhrrohr).

Frage 870. Aus einer Betrachtung der Figur 437 ergibt sich sofort, dass die größere oder geringere Zahl der Richtungen, in welchen sich der Schall ausbreitet, von welchem Einflusse auf die Schallintensität ist?

Erkl. 803. Als Biot eine in Paris angelegte neue Wasserleitung benutzte, um die Fortpflanzung des Schalles zu prüfen, da gelangte er zu dem merkwürdigen Resultate, dass die in den Röhren eingeschlossene Luftsäule den leisesten Schall bis zu sehr grosser Entfernung ungeschwächt fortpflanzt. Bei Benutzung der geräuschlosen Nachtstunden durchlief der Schall die Röhrenluft auf 951,25 m Länge so ungeschwächt, dass man ganz schweigen musste, wenn

Antwort. J e g r ö ß e r die Z a h l der R i c h t u n g e n i s t, in welchen der Schall sich ausbreitet, d e s t o k l e i n e r i s t in jeder einzelnen Richtung d i e S c h a l l s t ä r k e und je kleiner die Zahl der Richtungen ist, um so größer ist die Schallstärke; kann sich der Schall aber nur nach e i n e r Richtung fortpflanzen, so bleibt er fast ungeschwächt.

man nicht gehört werden wollte, denn Worte, so leise gesprochen, als wenn man sich ins Ohr flüstert, kamen ungeschwächt am anderen Ende an.

Frage 871. Durch welches einfache Mittel können wir also die Fortpflanzung des Schalles durch die Luft ausnehmend befördern?

Erkl. 804. Die redenden Türkenköpfe, wie man sie früher auf Kirchweihen und Messen den Neugierigen zeigte, und die auf einem Tische an der Wand zu stehen pflegten, in deren Ohr man die Frage flüsterte, um aus dem Munde die Antwort zu erhalten, gehören gleichfalls hierher. Diese jetzt aus der Mode gekommenen Vorrichtungen bestanden aus hohlen Köpfen, aus denen an der hinteren Seite eine Röhre durch die Wand ins Nebenzimmer ging, wo die statt des Kopfes vermittelst der Röhre hörende und antwortende Person ihren Platz hatte und durch die Verbindung dessen was sie hörte, mit dem, was sie durch eine feine Oeffnung wahrnahm, leicht die rätselhaften Fragen löste, die meistens von Ungebildeten aufgegeben und zu ihrer großen Verwunderung richtig beantwortet wurden.

Antwort. Die Fortpflanzung des Schalles durch die Luft wird ausnehmend befördert, sobald die letztere in feste Grenzen, also z. B. in Röhren, eingeschlossen ist. Die Röhren für Luft- oder Dampfheizung dienen leicht dazu, den Schall durch die entferntesten Gemächer der ausgedehntesten Gebäude fortzupflanzen, wobei auch Biegungen der Röhren nicht störend wirken.

Von der leichten Fortpflanzung des Schalles durch solche Kommunikationsröhren macht man auf Schiffen, in Hotels und Fabriken vielfache Anwendung, um Instruktionen nach weit entfernten Räumen zu geben, ohne dass der Schall auf seiner ganzen Bahn wahrnehmbar wird.

Frage 872. Welches Apparates bedient man sich, um die Tragweite der Stimme durch die (nicht in Röhren eingeschlossene) freie Luft zu steigern?

Antwort. Man kann die Tragweite der Stimme durch Anwendung eines Sprachrohres steigern. Dasselbe besteht gewöhnlich aus einem kegelförmigen Rohre (Fig. 438) mit einem Mundstücke M, in welches man hineinspricht, und einem weiten Schallbecher S. Man bedient sich desselben zur See, um sich auf große Entfernungen, trotz Wind und Wellen verständlich zu machen. Die Feuerwacht auf den Kirchtürmen hatte ein Sprach-

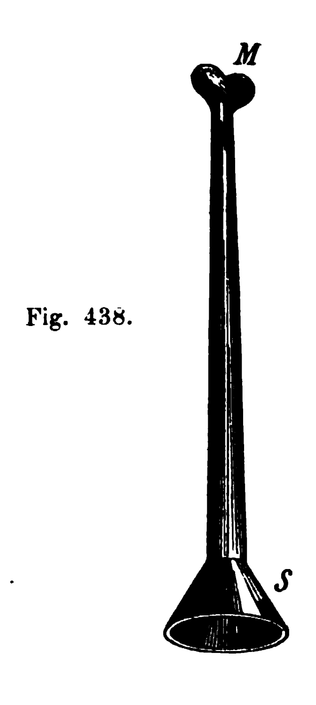


Fig. 438.

rohr, um den Ort des Feuers bekannt zu machen. Auf dem Lande ruft man damit die Arbeiter vom Felde, und manche Schaubudenbesitzer benutzen dasselbe, um das Volk anzulocken.

Frage 873. Warum ist ein Rohr von zylindrischer oder prismatischer Form weit weniger zum Sprachrohr geeignet, als ein kegelförmiges Rohr?

Antwort. Soll das Sprachrohr seinen Zweck erfüllen, so müssen die durch das Hineinsprechen erregten Verdichtungen der Luft, welche ohne dasselbe nach allen Richtungen sich ausbreiten würden, sich gegen dessen Wände so stemmen, dass sie bei ihrem weiteren Fortgange eine so viel als möglich der Achse des Rohres parallele Richtung annehmen, und dadurch den nach dieser Richtung ausgehenden Schall verstärken.

Fig. 439.

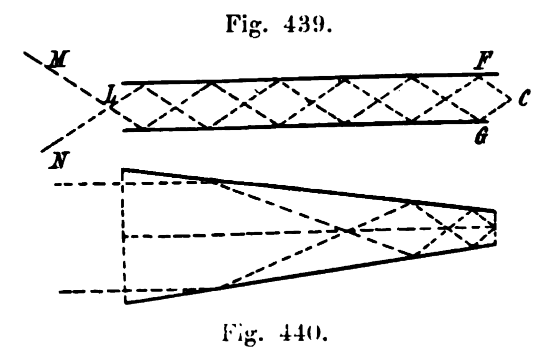


Fig. 440.

Erkl. 805. Die in der nebenstehenden Antwort gegebene Erklärung stammt von Chladni. Nach Hassenfratz wirkt das Sprachrohr nicht durch innere Reflexion und hierdurch erzeugte mehr parallele Richtung der Schallstrahlen,

sondern dadurch, dass der Schall vor seiner Ausbreitung eine größere Menge Luft zum Mitschwingen bringt und so verstärkt wird. In ähnlicher Weise scheint es sich zu erklären, dass der Schall sich in der Hauptrichtung des schallenden Körpers am stärksten fortpflanzt, wie der Knall eines Geschützes, der Ton eines Blasinstruments in der Richtung des Rohres, usw.

Das Sprachrohr ist von Samuel Morland 1670 erfunden worden, welcher solche Instrumente zuerst kleiner aus Glas, dann gegen 2 m lang aus Kupfer in der Gestalt eines abgestumpften Kegels verfertigen ließ, und mit deren Hilfe er die menschliche Stimme auf 4500 m fortpflanzen konnte.

Ein Rohr, das überall gleiche Weite hat, würde diesen Zweck nicht erfüllen. Die Schallstrahlen (siehe Fig. 439), die von dem Munde bei *C* nach den Richtungen *F* und *G* ausgehen, und ohne dasselbe sich nach diesen Richtungen zerstreuen, würden zwar zusammengehalten und innerhalb des Rohres mehreremale gebrochen werden, beim Herausgehen aber würden sie sich nach den Richtungen *M* und *N* und so überhaupt nach allen Richtungen zerstreuen; man würde also durch ein solches Rohr weiter nichts gewinnen, als dass der Schall ungeschwächt bei *L* austritt. Ein solches würde also nur als Kommunikationsrohr brauchbar sein. Um aber den Schall in der Entfernung verstärkt hören zu lassen, ist es notwendig, dass sich das Rohr in Form eines abgekürzten Kegels erweitert; es werden alsdann in demselben alle an dessen Seitenwände anstoßenden Schallstrahlen so gebrochen, dass sie nach einer oder mehreren Brechungen (siehe Fig. 440) mit der Achse parallel werden.

Frage 874. Was versteht man unter Sprachsälen oder Sprachgewölben?

Antwort. Sprachsäle oder Sprachgewölbe sind solche Säle oder Gewölbe, wo mehrere nach verschiedenen Richtungen zerstreute Schallstrahlen in einem engen Raume zusammenkommen, wo man also den an einem gewissen Orte erregten schwachen Schall an einem anderen entfernten Orte deutlich hört, während man ihn an anderen weit näheren Orten wenig oder gar nicht hören kann. So hört man z. B. in der Kuppel der Paulskirche zu London eine Taschenuhr, die sich an dem einen Ende befindet, an dem andern Ende schlagen. In einer Gallerie zu Glocester können zwei

Erkl. 806. Die Erscheinungen dieser Art lassen sich nur unvollständig aus der Zurückwerfung der Schallstrahlen herleiten. Die Oberflächen scheinen hier den Schall, wie Wasser in einem Flußbette, fortzuleiten. Hutton erzählt, dass man an einer Gartenmauer zu Kingston leises Flüstern bis auf 60 m Entfernung hörte. Hassenfratz brachte eine Taschenuhr an das eine Ende eines aus zwei Brettern zusammengeschlagenen Troges und fand, das er dieselbe nun auf 25 Schritte hören konnte, wäh-

rend er sie vorher nicht über zwei Schritte zu hören vermochte. In der Pariser Sternwarte existiert ein sechseckiges Zimmer, dessen gegenüberstehende Winkel durch an der Decke hinlaufende Rinnen verbunden sind; wenn sich zwei Personen in zwei entgegengesetzte Ecken stellen, so können sie sich flüsternd und den Umstehenden unhörbar verständigen. Eine gewölbte Vorhalle über dem Aufgange zur Treppe des Konservatoriums für Kunst und Gewerbe in Paris bietet dieselbe Eigentümlichkeit. Der Schall gleitet hier längs der Kante eines aus Klosterbogen gebildeten Gewölbes fort und kommt in den Ecken herunter. Personen in einer Entfernung von 50 m sich leise unterhalten. In der Kathedralkirche zu Girgenti in Sizilien hört man, wenn an der geschlossenen Türe leise gesprochen oder sonst ein schwacher Schall erregt wird, solchen sehr deutlich und verstärkt am anderen Ende, ohngeachtet man ihn außerdem kaum zwei Schritte weit hört. Eins der bekanntesten Beispiele ist das Ohr des Dionysius (grotta della favella) in den Steinbrüchen zu Syrakus, welches der Sage nach von Dionysius soll dazu eingerichtet worden sein, um alle Reden der unten befindlichen Gefangenen in einem Zimmer über demselben zu hören. Im Ratskeller zu Bremen befindet sich gleichfalls eine Flüstergalerie.

Frage 875. Das Gegenteil von dem, was beim Sprachrohre gesagt worden ist, zeigt sich bei dem Hörrohre; welchem Zwecke dient dasselbe?

Antwort. Das Hörrohr, welches schwerhörige Personen gebrauchen, um die Wirkung des Schalles auf das Trommelfell zu verstärken, soll viele Schallstrahlen in einem kleinen Raume vereinigen, weshalb man demselben die Form eines Trichters (siehe Fig. 441) gibt. Man begreift leicht,

Fig. 441.

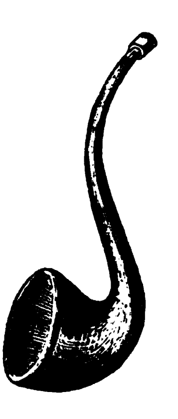
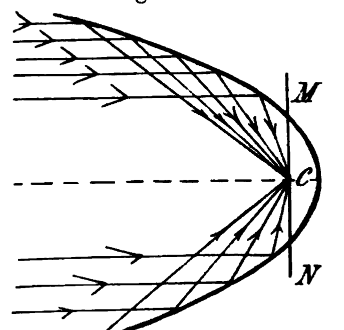


Fig. 442.



dass die von der weiten Fläche der Oeffnung aufgefangene Bewegung, indem sie sich in immer kleineren Durchschnitten konzentriert,

in dem engen Ende intensiver ist, als sie in der freien Luft war.

Nach Lambert ist die parabolische Gestalt hierzu am vorteilhaftesten, indem eine Parabel (siehe Fig. 442) die Eigenschaft hat, alle parallel mit der Achse einfallenden Strahlen in ihrem Brennpunkte zu vereinigen. Man muß also oberwärts die Parabel bis an den Brennpunkt c durch eine Ebene MN abschneiden und an dieser Stelle ein Röhrchen anbringen, welches man in das Ohr stecken kann. In der Ausführung bedient man sich auch noch anderer Formen.

---

c) Akustische Seezeichen oder Nebelsignale.

Frage 876. Zur Verhütung von Schiffsunfällen bei nebligem Wetter, oder bei Regen- und Schneefall, führte man als Ersatz für das Licht der Leuchttürme, welches den Nebel nicht zu durchdringen vermag, welche Arten von Schallsignalen ein, die laut genug ertönen müssen, um die Seefahrer zu warnen und zu leiten?

Antwort. Als Vorrichtungen für Nebelsignale, welche sich fast auf jedem Leuchtturme oder Leuchtschiffe befinden, benutzt man Gongs, Glocken, Kanonen, Pfeifen, Zungenhörner und Sirenen. Die Gongs, mit denen man früher Leuchtschiffe ausrüstete, haben sich als unbrauchbar erwiesen, weil ihr Schall nicht durchdringend genug ist. Aber auch Glocken von 3 bis 4 Zentner Gewicht sind als zu schwache Schallquellen zu verwerfen. Kräftiger wirken Kanonenschläge, die man durch Explosion von 3 Pfund Pulver erzielt. In neuerer Zeit hat man mit Erfolg an ihre Stelle die Explosion von 120 g Schießbaumwolle gesetzt, deren Schall noch schärfer und durchdringender ist. Die Ladung wird entweder an einer langen Spiere befestigt und auf elektrischem Wege vom Leuchtturme aus entzündet, oder man läßt sie durch eine Rakete auf etwa 180 m Höhe befördern und dort abbrennen. Trotzdem

Erkl. 807. Die bei den Nebelsignalen bisher benutzten Schalltrichter sind von sehr verschiedener Länge und Form, aber stets konisch und von kreisförmigem Querschnitt. Wie durch Versuche festgestellt wurde, ist der Schall am stärksten und gleichförmigsten, wenn der Eigenton des Schalltrichters mit dem Tone des Apparats überein-

stimmt. Auch ist eine elliptische Querschnittsform vorzuziehen, derart, dass der horizontale Durchmesser der Mündung nicht größer ist, als die halbe Wellenlänge des Signaltones, während der senkrechte Durchmesser das Doppelte dieser Wellenlänge betragen soll.

Die Hörweite ist in der Achse des Schalltrichters am größten und fällt nach den Seiten hin mehr und mehr ab (siehe Antwort 867). Um den Schall über einen größeren Bogen des Horizontes (220° bei den Versuchen) auszubreiten, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, dass man zwei Trichter, deren Achsen einen Winkel von 120° einschließen, nebeneinander aufstellt und ihre Sirenen gleichzeitig erklingen läßt. Soll noch mehr vom Horizont bestrichen werden, wie bei Feuerschiffen, wo die Warnungssignale nach allen Seiten gegeben werden sollen, so ist ein Schalltrichter mit sogenanntem Pilzhute zu verwenden. Bei diesem steht ein umgekehrter Kegel mitten über der Oeffnung eines senkrechten kegelförmigen Schalltrichters so, dass er den Schall möglichst horizontal nach allen Seiten reflektiert. Die Richtung auf den Horizont zu ist nämlich günstiger, als wenn der Schall in einem Winkel abwärts auf die See geworfen wird.

der Knall nur von kurzer Dauer ist und deshalb leicht überhört werden kann, wird man auf das Explosionssignal dort nicht verzichten, wo maschinelle Anlagen zur Erzeugung lang anhaltender Töne fehlen. Von diesen erfordern die Dampf- und Luftpfeifen einen hohen Druck, wodurch ihr Betrieb kostspielig wird. Die Zungenhörner arbeiten mit aufschlagenden Zungen. Konstruktionen, bei denen mehrere gleichgestimmte Zungen ihren Ton in denselben Schalltrichter geben, sind weniger wirksam als solche mit nur einer Zunge. Der Ton ist aber für größere Hörweiten noch zu schwach. Die ersten Sirenen bestanden aus zwei flachen Scheiben mit an Zahl und Gestalt gleichen Schlitzen. Des leichteren Antriebes wegen hat man später Zylindersirenen gebaut. Indessen hat sich bei den letzten englischen Versuchen eine neue Form der Scheibensirene von 18 cm Durchmesser vortrefflich bewährt. Bei den Zylindersirenen tritt Luft oder Dampf durch die Längsschlitze eines Zylinders von außen nach innen ein und dreht hier einen inneren Zylinder mit entsprechenden Schlitzen um. Bei der Sirene von St. Catherines Point hat der Zylinder einen Durchmesser von 13 cm und trägt 24 Schlitze, so dass bei 240 Umdrehungen in der Minute der Ton 96 Schwingungen in der Sekunde hat. Da die Sirene beim automatischen Anblasen erst allmählich ihre Drehungsgeschwindigkeit erlangt, so wird die Dauer des Signaltones dadurch verkürzt und seine Wirkung geschwächt. Daher ist es erwünscht, die Drehung durch einen besonderen Motor zu bewirken und erst bei voller Geschwindigkeit der Druckluft Zutritt zu gewähren.

Frage 877. Zur Unterscheidung der Stationen an den brittischen Küsten hat man Kombinationen von 2 bis zu 4 Tönen verschiedener Höhe in einem Signale angewandt, und dabei welche Erfahrungen gemacht?

Erkl. 808. Mohn hat beim Studium von Schallsignalen am Eingange des Christianiafjordes beobachtet, dass bei ziemlich frischem Winde das Sausen in den Grashalmen auf freiem Felde ein mittelstarkes Signal im Schutze eines nahen Turmes übertönte. Daher muß auch das Schiff stets gestoppt werden, wenn man auf ein Nebelsignal hören will.

Antwort. Bei diesen aus verschieden hohen Tönen zusammengesetzten Signalen ergab sich, dass die Töne u n g l e i c h s t a r k und zum Teil g a r n i c h t gehört wurden. Die hierauf angestellten Versuche ergaben, dass bei ruhigem Wetter die tiefen, bei Gegenwind und bewegter und geräuschvoller See die hochgestimmten Töne weiter zu hören sind.

Frage 878. Tyndall beobachtete am Kap South-Foreland in der Nähe von Dover, bei Gelegenheit von Versuchen, welche er anstellte, um die Tragweite von Tonsignalen an der Küste bei nebligem Wetter zu studieren, eine interessante Erscheinung, welche als S e e e c h o bezeichnet wird und sich in welcher Weise bemerklich macht?

Erkl. 809. Die Resultate, welche man bei der Prüfung des Wertes und der Leistungsfähigkeit der Schallsignale erhielt, waren anfänglich voller Widersprüche. Robinson schreibt (1863) über solche Nebelsignale: Bis jetzt sind alle Schallsignale in der Luft gemacht worden, obgleich dieses Medium große Nachteile bietet, indem seine eigenen Strömungen mit den Schallwellen zusammentreffen, so dass ein Schuss oder eine Glocke, die man einige Kilometer in der Richtung des Windes hörte, schon einige Meter gegen seine Richtung unhörbar sind. Das Schlimmste aber ist, dass der Schall am wenigsten wirksam ist, wenn man ihn am notwendigsten braucht; denn der Nebel ist ein gewaltiger Dämpfer des Schalles. — Nebel ist eine Mischung von Luft und Wasser-

Antwort. Von einem Standorte auf der Klippe in kurzer Entfernung von der Signalstation wurde beobachtet, dass bei schönem klarem Wetter das Blasen der Sirenen oder der Zungenhörner fast sofort durch widerhallende Töne ergänzt wurde. Diese Töne verstärkten den direkten Schall so lange er anhielt und verlängerten den Schall für einige Zeit, nachdem das Blasen der Apparate aufgehört hatte. Dieses Echo schien von einem Punkte in der Verlängerung der Trompetenachse auszugehen und mit großer Geschwindigkeit über die weite See sich zu verbreiten, als ob eine zerstreute Schar Trompeter in schneller Aufeinanderfolge von allen Teilen des Horizontes bliese. Durch sorgfältige Zeitbestimmungen wurde festgestellt, dass der Widerhall häufig 30 Sekunden dauerte. Dieser überraschende Effekt wurde beobachtet, wenn der Himmel wolkenlos und die See glatt und ruhig, sowie kein Schiff in Sicht war. Offenbar waren es Luftechos,

kügelchen, und an jeder dieser unzählbaren Oberflächen, wo deren zwei sich berühren, wird ein Teil der Bewegung reflektiert und geht verloren. Schnee bringt dieselbe Wirkung hervor, nur dass er noch schädlicher wirkt." Auch Alexander Beazeley sagt (1871): „Der Nebel besitzt eine merkwürdige Kraft den Schall zu ersticken und verfährt in dieser Beziehung so unregelmäßig, dass Versuche, die in klarem Wetter angestellt werden, keinen oder sehr geringen praktischen Wert haben." Dagegen erklärte James N. Douglass, dass nach seiner Erfahrung er nur geringen Unterschied in der Fortbewegung des Schalles in nebligem oder in klarem Wetter gefunden habe. Er hatte im Nebel bei den Small's Rock in dem Bristol Kanal ganz deutlich die Schüsse gehört, die in Milford, in einer Entfernung von 40 km, abgefeuert wurden.

möglicherweise verursacht durch Reflexion der Schallwellen zwischen Schichten von verschiedener Dichte oder akustischen Wolken. Tyndall hat gemeint, dass die Dauer des Widerhalles ein Maß für die Tiefe der Atmosphäre abgebe, aus der er kommt. Wenn dies so wäre, dann könnte die Länge und Stärke des Widerhalles ein rohes Anzeichen für die durchdringende Kraft der Apparate sein, ohne dass man Beobachtungen auf See machte.

Frage 879. Auf welche Weise suchte Tyndall diese merkwürdige Erscheinung zu erklären?

Antwort. Die Ursache dieser merkwürdigen Erscheinung erblickte Tyndall darin, dass bei höher steigender Sonne infolge der sich auf der Meeresoberfläche reichlich bildenden Wasserdämpfe

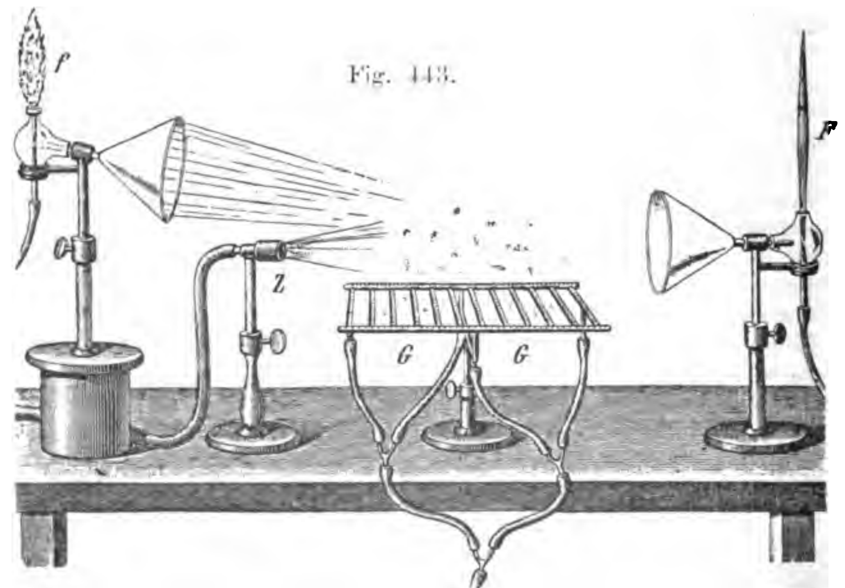


Fig. 143.

unsichtbare Ströme aufsteigen, durch welche eine Reflexion der ankommenden Schallwellen erzeugt und so ein weiteres Vordringen derselben verhindert wird. Bisher hatte man dagegen angenommen, dass Wolkenechos durch die Beobachtung bewiesen seien, aber hörbare Echos niemals in optisch klarer Luft vorkämen. Bei Tyndalls Versuchen wurden aber Hunderte von Kanonenschüssen abgefeuert, und auch bei völlig wolkenfreiem Himmel wurde ein darauf folgendes Rollen vernommen, welches man bisher nur dem Echo in den sichtbaren Wolken zugeschrieben hatte. Es folgte dieses Rollen überdies so plötzlich auf den direkten Schall, dass kaum eine bemerkbare Unterbrechung zwischen dem Schall und dem Echo wahrzunehmen war. Dies könnte nicht der Fall sein, wenn die Wolken die Ursachen des letzteren gewesen wären. Eine reflektierende Wolke würde in der Entfernung von 1,6 km ein Intervall von fast 10 Sekunden zwischen Schall und Echo bedingen, was aber keineswegs beobachtet wurde. Tyndalls Beobachtungen beweisen überzeugend, dass vollkommen durchsichtig erscheinende Luft fähig ist, Echos von großer Intensität und langer Dauer hervorzurufen. Ueberdies hat derselbe Forscher durch Experimente nachgewiesen, dass kein Schall durch eine klare, optisch durchsichtige aber akustisch undurchlässige Atmosphäre, welche aus mehreren miteinander abwechselnden Schichten von Kohlensäure und Leuchtgas zusammengesetzt war, hindurchgehen konnte, und nicht nur Gase von verschiedener Dichtigkeit wirken in dieser Weise auf den Schall, sondern atmosphärische Luft in Schichten von verschiedener Temperatur wirkt ebenso. Es kann aber auch durch Ver-

Erkl. 810. Um seine Erklärungsweise zu prüfen, stellte Tyndall in seinem Laboratorium entscheidende Versuche an, von denen hier nur der folgende erwähnt sei, welcher leicht zu wiederholen ist. Auf der einen Seite eines Gasbrenners $G\,G$ (Fig. 443), der die Gestalt eines rechteckigen Rostes hat, befindet sich eine kleine Zungenpfeife Z, auf der andern Seite eine empfindliche Flamme F. Ist das Gas noch nicht angesteckt, so zuckt die empfindliche Flamme, wenn man die Pfeife anbläst; zündet man aber das Gas an, dann beruhigt sich die Flamme wieder; dagegen fängt nun eine zweite, hinter der Pfeife stehende Flamme f, welche von der direkten Schallwelle nicht erreicht werden kann, stark zu zucken an, während sie in Ruhe blieb, so lange das Gas nicht brannte. Die heiße Luftschicht, welche sich über dem Roste erhebt, bildet also ein Hindernis für den Schall und wirft ihn zurück, genau wie bei den Versuchen in freier Luft.

Erkl. 811. Bei der Ventilierung der Londoner Parlamentshäuser bemerkte Reid, dass der in der Mitte des Saales aufsteigende mächtige Luftstrom, wenn die Heizung im Gange war, die Worte des Redners auf der gegenüberliegenden Seite des Saales unverständlich machte. In den großen Musikhallen zu Boston und Liverpool hat man deshalb die Beleuchtung 16 m über dem Boden angebracht, damit die Verbrennungsgase sofort durch die Decke entweichen können, ohne die Luft zu trüben. (Zamminer.)

suche gezeigt werden, wie Luft, die mit Dämpfen flüchtiger Flüssigkeiten in verschiedenem Maße gesättigt worden ist, dieselbe Wirkung hervorrufen kann. Tyndall hat aber nicht nur bewiesen, dass die akustischen Wolken den Schall auffangen, sondern auch, dass der Schall, dem der Durchgang versagt worden ist, durch Reflexion zurückgeworfen wird.

Frage 880. Tyndall hatte auch Gelegenheit zu beobachten, dass dichter Nebel die Fortpflanzung des Schalles (entgegen der in Erkl. 809 geäußerten Ansicht), in welcher Weise beeinflußt?

Erkl. 812. Bei seinen vielen Versuchen mit Rauch und künstlich erzeugten Nebeln erfuhr Tyndall, dass dieselben den Durchgang des Schalles nicht beeinflußten, wenn sie auch noch so dicht waren, vorausgesetzt, dass der aus schwelendem Papier oder verbranntem Harz oder Schießpulver entwickelte Rauch oder die aus Ammoniak und Salzsäure, sowie aus kochendem Wasser sich bildenden Dämpfe keine wesentlich höhere Temperatur besitzen, als die der umgebenden Luft; sind dagegen die aufsteigenden Dämpfe und Nebel heiß, so ist die hemmende Wirkung auf die Schallwellen so stark, dass eine empfindliche Flamme hoch und ruhig brennt. Also Beobachtungen und Versuche beweisen, dass Nebel keinen besonderen Einfluss auf den Schall haben und Wolkenechos nicht wahrscheinlich sind.

Antwort. Derselbe Forscher hatte Gelegenheit zu beobachten, dass an vielen Tagen des dichtesten Nebels sich der Schall doppelt so weit verbreitete als an andern Tagen von vollkommener optischer Durchsichtigkeit. „Eine ungewöhnlich große Schallmenge erfüllte die Luft während dieser Versuche. Der Widerhall des Lärms der Bayswater- und Knightbridge-Straßen, der Klang der großen Glocke von Westminster, die Eisenbahnpfeifen, die oft angeblasen wurden, und die Nebelsignale, die an den verschiedenen Stationen der Hauptstadt erdröhnten, wurden alle mit großer Intensität gehört. Dies entsprach auf keinen Fall den so kategorisch gemachten Angaben über die akustische Undurchdringlichkeit des Londoner Nebels.“

Frage 881. Bis zu Tyndall's Untersuchungen wurde auch der Regen als ein mächtiger Schalldämpfer angesehen, was hat aber dieser Forscher durch seine Versuche auf See in Erfahrung gebracht?

Antwort. Tyndall hat durch Versuche auf See in Erfahrung gebracht, dass durch heftigen Regen der Schall nicht geschwächt wird, sondern im Gegenteil an Kraft zunimmt. Selbst als sich

Erkl. 813. Bei klarer Luft ebenso wie bei Nebel und Schnee ist eine auffallende Ungleichheit der Hörweite zu verschiedenen Zeiten beobachtet worden, ohne dass eine erklärende Besonderheit der atmosphärischen Zustände unmittelbar zu ermitteln war. So wurde z. B. in einer Seemeile Entfernung ein starker Schall beobachtet, welcher zwischen 2 und 3 Seemeilen unhörbar wurde, in etwas größerer Entfernung wieder zu hören war und in beträchtlicher Entfernung laut und deutlich klang. Durch solche außerordentlich wechselnden Hörweiten können aber leicht Schiffsunfälle herbeigeführt werden.

mächtige Hagelschauer zu dem Regen gesellten, hörte man inmitten furchtbaren Sturmes deutlich die Nebelhörner und Sirenen, und als das Regenschauer nachließ, und so das von ihm bedingte Geräusch abnahm, nahmen die Töne so an Kraft zu, dass wir sie in der Entfernung von 12 km deutlicher hörten, als früher in der regenlosen Atmosphäre bei 8 km.

Frage 882. Man hat den fallenden Schnee als das allergrößte Hindernis für den Durchgang des Schalles angesehen, während Tyndall zu welchem Resultate gelangt ist?

Erkl. 814. Wurde das Taschentuch in Wasser getaucht, so genügte eine einzige nasse Lage, welche die Flamme eben so erfolgreich beruhigte, wie ein Brett. Legte man das Taschentuch zwischen zwei Löschblätter und drückte es so aus, dass das Wasser entfernt wurde, so wurde seine Durchlässigkeit sogleich wieder hergestellt. Folglich gehen die Schallwellen durch die Zwischenräume des Gewebes. Ferner ging der Schall ohne merkliche Unterbrechung durch dünne Seide, weiches Leinen, und dicken Flanell. Selbst durch eine Lage von dichtem harten Filz gingen die Schallwellen mit solcher Energie, dass sie die Flamme bedeutend beunruhigten. Der Schall ging durch 200 Lagen von baumwollenem Netzgewebe frei hindurch. Sowohl durch den Filz, wie durch das baumwollene Netz konnte man, wenn man sie an den Mund legte, Luft hindurchziehen. Eine einzige Lage von dünner geölter Seide, oder ein Blatt Schreibpapier hielt den Schall auf.

Antwort. Tyndall konnte sich bei heftigem Schneewetter auf 800 m Entfernung mit seinem Assistenten verständigen und ebenso in umgekehrter Richtung die Stimme seines Assistenten hören. „Die Flocken fielen auf dem Mer de Glace so dicht, dass ich nur von Zeit zu Zeit die Gestalten der sich entfernenden Männer erblicken konnte. Dennoch war die Luft durch die die Flocken fielen, für den Schall ununterbrochen.“ Tyndall führte entsprechende Versuche mit Hilfe einer empfindlichen Flamme aus und zeigte, dass ein Stück Glas, ein Brett oder die Hand den Schall zurückwirft, während ein gewöhnliches baumwollenes Taschentuch kaum merklich auf den Schall einwirkte. Durch zwei Lagen des Taschentuches hindurch wurde die Flamme stark bewegt, und sogar hinter 6 Lagen war sie noch nicht ganz still. (Siehe Erkl. 814.)

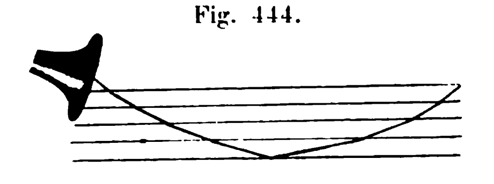
Man kann diese Versuche auch ohne empfindliche Flamme mit Hilfe einer tickenden Uhr ausführen, welche man in geringer Entfernung vom Ohre aufhängt, um dann zwischen Uhr und Ohr die genannten Körper zu halten. Auch durch künstliche Schauer aus Wassertropfen, Samen, Sand, Kleie, Flocken verschiedener Art geht der Schall wie durch den wirklichen Regen, Hagel und Schnee.

Frage 883. Aus allen diesen Erscheinungen ergibt sich welcher Satz über optische Klarheit und akustische Trübung?

Antwort. Es kann an Tagen von wunderbarer optischer Klarheit die Atmosphäre von unsichtbaren akustischen Wolken erfüllt sein, während optisch trübe Tage akustisch klar sein können. Oder: O p t i s c h e T r ü b u n g i s t a k u s t i s c h e K l a r h e i t, u n d o p t i s c h e K l a r h e i t i s t a k u s t i s c h e T r ü b u n g.

Frage 884. Wie schon in Erkl. 813 angedeutet wurde, kann man gelegentlich, wenn ein Schiff gerade auf die Schallquelle zufährt, kurz hintereinander Hörbarkeit und Verschwinden eines Signals in mehrfachem Wechsel feststellen. In welcher Weise hat Mohn (1892) im Anschluß an Versuche im Christianiafjord diese Erscheinung erklärt?

Fig. 444.

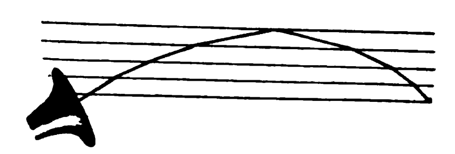


Erkl. 815. Bei dieser Theorie ist auch sofort begreiflich, dass die Hörweite sich oft in kurzer Zeit ändern wird. Denn die meteorologischen Elemente, von denen sie abhängt, können innerhalb der kleinen Beträge ,um die es sich hier handelt, sehr wohl in kurzer Zeit bald

Antwort. Er ging wie Tyndall von der Tatsache aus, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in wärmerer Luft grösser ist, als in kälterer, und dass sie von einem grösseren Gehalte der Luft an Wasserdampf in demselben Sinne beeinflusst wird, wie von grösserer Erwärmung. Schallstrahlen, die aus einer kälteren, wasserdampfärmeren Schicht in eine wärmere, wasserdampfreichere eintreten, werden wie Lichtstrahlen, die aus dem dichteren ins dünnere Mittel kommen, vom Einfallslote abgebrochen; und ebenso wie bei diesen muss totale Reflexion eintreten, wenn der Einfallswinkel dabei eine bestimmte Grösse überschreitet. Da nun der absolute Gehalt an Wasserdampf fast immer nach oben zu abnimmt, die Temperatur unter den gewöhnlichen Verhältnissen ebenfalls, so hielt Mohn eine h o r i z o n t a l e A n o r d n u n g

nach der einen, bald nach der anderen Seite wechseln. Die Hörbarkeitsgrenze kann daher kurz hintereinander über einen und denselben Ort hinweg sich nach der Schallquelle hin und von ihr fort verschieben und so den Ort innerhalb und außerhalb der Hörweite verlegen.

Fig. 445.



Erkl. 816. Nehmen wir nun den Fall der Temperaturumkehr an, wo die Temperatur mit der Höhe zunimmt, so werden die Schallwellen in den oberen Schichten schneller laufen als in den unteren, und die Schallstrahlen werden bei ihrem Wege von einer hoch gelegenen Schallquelle zur Erdoberfläche Kurven beschreiben, die der Erdoberfläche ihre Hohlseite zukehren. (Siehe Figur 445). In diesem Falle wird die Hörbarkeitsgrenze erst da eintreten können, wo die immer weitere Ausbreitung den Schall schließlich so weit abgeschwächt hat, dass er nicht mehr gehört wird. Ueber dem freien Meere wird die Temperaturumkehr wohl kaum öfters vorkommen. Wohl aber kann die intensive Ausstrahlung des Landes in der Nähe der Küste häufiger diesen Zustand der Atmosphäre schaffen, namentlich des Nachts.

der verschiedenen Luftschichten für geeignet, die Erscheinung zu erklären.

In oberen Schichten langsamer, in unteren schneller, zeigt die Fortpflanzung des Schalles in der Regel ein umgekehrtes Verhalten, wie für gewöhnlich das Licht. Die Schallstrahlen, die von einer hoch gelegenen Schallquelle nach der Erdoberfläche zu ausgehen, werden daher, umgekehrt wie Lichtstrahlen, in Kurven laufen, die ihre konvexe Seite nach unten kehren. (S. Fig. 444.) In einem gewissen Abstande wird für einen Strahl von bestimmter Ausgangsrichtung unmittelbar über der Erdoberfläche totale Reflexion eintreten; der wieder aufsteigende Teil seines Weges wird den Raum, innerhalb dessen der Schall gehört wird, von dem dahinter liegenden Raume über der Erdoberfläche abgrenzen, der gewissermassen im Schallschatten liegen bleibt. Alle noch schräger abgehenden Strahlen werden dann schon gar nicht mehr bis auf die Erdoberfläche hinunterdringen können, sondern bereits vorher reflektiert werden. Damit ist eine Grenze der Hörbarkeit auf der Erdoberfläche gegeben; damit ist auch klar, dass die Hörweite um so kleiner sein wird, je schneller Temperatur und Dunstdruck mit der Höhe abnehmen, und dass diese Grenze für ein höher über der Erdoberfläche gelegenes Ohr in weiterem Abstande von der Schallquelle liegen wird. Ein Mittel aus 17 Beobachtungen ergab, dass die Signalstärken, die gleichzeitig von Deck aus und von der Sahling (in Masthöhe) beobachtet wurden, sich wie 1,8 zu 2,4 verhielten; und zwei mal wurde bei Mohns Versuchen auf Deck nichts mehr gehört, wo von der Sahling das Signal noch gut wahrgenommen wurde.

Frage 885. Bisher war nur von ruhiger Luft die Rede. Was nun die Wirkung des Windes auf die Fortpflanzung des Schalles betrifft, so sprach John Herschel seine Verwunderung über die Verschiedenheit in der Schallstärke der Kirchenglocken aus, je nachdem die Richtung des Schalles mit der Richtung des Windes übereinstimmte oder ihr entgegengesetzt war. Welche Erklärung gab (1857) Professor Stokes?

Antwort. Stokes gab folgende Erklärung dieser Erscheinung: Beim Winde ist die Fortbewegung der Luft nahe an der Oberfläche der Erde langsamer als in einiger Entfernung über derselben, da die Luft durch die Reibung an der Erde und durch ihre innere Reibung zurückgehalten wird. Die momentane Lage eines kleinen Teilchens (d. h. der gleichzeitig von der Bewegung ergriffenen Teilchen) einer Schallwelle, die sich gegen den Wind nahe der Erde bewegt, sei durch eine vertikale Linie dargestellt. Der oberste Teil der Welle, der am weitesten von der Erdoberfläche entfernt ist, wird durch die bewegte Luft mehr als der unterste Teil zurückgetrieben, da diesem ein Wind von geringerer Geschwindigkeit entgegenweht. Die Welle hört daher bald auf, vertikal zu stehen, da ihr oberer Teil sich nach rückwärts biegt. Nun erfolgt die fortschreitende Bewegung einer Schallwelle immer im rechten Winkel zu ihrer Vorderseite und eine kurze Ueberlegung zeigt, dass eine Welle, deren Vorderseite der Wind in der beschriebenen Weise zurückbiegt, nicht horizontal fortschreitet, sondern schräg aufwärts steigt.

Erkl. 817. Nach nebenstehender Erklärung werden also die Schallstrahlen auf der dem Winde zugekehrten Seite nach oben gekrümmt sein; hier wird ein Schallschatten entstehen müssen, und zwar wird die Hörweite um so kleiner sein, je schneller die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt. In der Richtung mit dem Winde werden dagegen die Schallstrahlen die Hohlseite ihrer Krümmung der Erdoberfläche zukehren.

Liegt bei den betreffenden atmosphärischen Zuständen die Hörbarkeitsgrenze so, dass ein Ort von dem Schalle nicht mehr getroffen wird, so wird auch eine Verstärkung der Schallquelle keine Aenderung bewirken, denn der Schall wird stets in gekrümmter Bahn aufwärts über den Ort fortschreiten. Man könnte aber den Ort dadurch in die Hörweite bringen, dass man die Schallquelle höher legt.

Frage 886. Wie gestaltet sich der von Osborne Reynolds erbrachte experimentelle Beweis der vorstehenden Theorie?

Antwort. Seine Schallquelle war eine kleine elektrische Glocke, die gehoben und gesenkt werden konnte. Läutete er sie in windigem Wetter und wandte sich windwärts, so fand er, dass in einer bestimmten Entfernung die

Erkl. 818. Auch jede andere Ursache, die einen Unterschied der Bewegung in den verschiedenen Teilen einer Schallwelle erzeugt, ruft eine ähnliche Wir-

kung wie der Wind hervor. Nimmt man z. B. an, dass die Luft dicht an der Erdoberfläche wärmer als über derselben ist, so bewegt sich das Ende der Schallwelle nahe am Boden in stillem Wetter rascher, als die Teile der Welle, die etwas höher über demselben liegen. Auf solche Weise neigt sich eine anfänglich vertikale Welle und schreitet infolge ihrer schiefen Richtung wie beim entgegenkommenden Winde schräg nach aufwärts fort.

Schallwellen über seinem Kopfe fortgingen. Er fand auch, dass, wenn er die Glocke hob, ihr Schall weiter gegen den Wind gehört wurde, als wenn sie nahe dem Boden stand.

Frage 887. Es ist bekannt, dass wir bei einem Gewitter nur noch selten einen Donner hören, wenn 40 bis 50 Sekunden nach dem Erscheinen des Blitzes donnerlos verstrichen sind, was einer Entfernung von etwa 15 km entsprechen würde. Diese Hörweite ist aber für die mächtige Schallquelle des Donners eine so kurze, dass man sie nicht gut auf eine Schwächung des Schalles durch die Ausbreitung zurückführen kann. Worin hat diese Erscheinung vielmehr (nach Meinardus, 1894) ihren Grund?

Antwort. Meinardus zeigte, wie sowohl vor als auch nach einem Gewitter die atmosphärischen Bedingungen für die Herausbildung eines Schallschattens vorhanden sind, indem der Wind auf das Gewitter zuzuwehen pflegt und die Temperaturabnahme mit der Höhe ebenfalls besteht. Dass wir bei manchem Wetterleuchten die schärfsten Blitze durch die Atmosphäre zucken sehen, ohne eine Spur des Donners zu vernehmen, wird demnach seinen Grund darin haben, dass der Schall des Donners an den unteren Luftschichten mit größerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit total reflektiert wird und nun über unseren Köpfen dahingeht. Im Einklange damit kann man von einem Ballon oder auf Bergen tatsächlich den Donner auf weitere Entfernungen hören, als in der Ebene.

Erkl. 819. Nimmt man in Uebereinstimmung mit den mittleren Verhältnissen als Zunahme für die Windgeschwindigkeit auf 100 m $1/3$ m vor, 1 m nach dem Gewitter an und setzt man die Temperaturabnahme für 100 m auf 0,8° *C* vor und auf 0,5° *C* nach dem Gewitter, und die mittlere Höhe der Gewitterwolken zu 1400 m, so würde der Donner des heranziehenden Gewitters erst gehört werden, wenn das Gewitter sich auf 12 km genähert hat, bei 15 m Geschwindigkeit für das Gewitter also etwa 13 Minuten vor dem Ausbruche. Nach dem Gewitter würde die Hörweite sogar nur 8 km betragen. (Teilweise nach W. Stahlberg, Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht, 16. Jahrgang, S. 37.)

Frage 888. Welche neue Art des Signalisierens zur See führte der italienische Erfinder Tullio Giaro mit einer Anzahl gesetzlich geschützter Apparate den Besuchern der Weltausstellung in St. Louis (1904) vor?

Erkl. 820. Ergebnis der Tyndall'schen Versuche: Durch Luftströme verschiedener Temperatur oder verschiedener Sättigung mit Wasserdampf wird die Atmosphäre für den Schall schwer durchlässig (trübe). Akustische Wolken fliegen unaufhörlich durch die Luft, und selbst die durchsichtigste Atmosphäre kann von ihnen erfüllt sein. Der Schall wird durch wiederholte Reflexionen in der akustischen Wolke vernichtet, gleichwie Licht in einer gewöhnlichen Wolke. Und wie letzteres, von einer gewöhnlichen Wolke reflektiert, das Auge erreicht, so erreicht der von einer unsichtbaren akustischen Wolke zurückgeworfene Schall das Ohr. So können selbst in der klarsten Luft Echos von großer Intensität und langer Dauer entstehen. Regen, Hagel, Schnee oder Nebel können den Schall nicht merklich aufhalten. Bisweilen pflanzt die Atmosphäre tiefe, und zu anderer Zeit hohe Töne besser fort.

Antwort. Giaro benutzt dazu die bisherigen akustischen Mittel (siehe Antwort 876) der Marine, also Dampfpfeifen, Nebelhörner und Glocken, wendet aber, da diese Signale den Nachteil haben, nur auf kurze Entfernung deutlich hörbar zu sein, nach dem Vorbilde der drahtlosen Telegraphie gewisse Sende- und Empfangsapparate an, durch die der Schall der akustischen Signale auf sehr weite Entfernungen übertragen werden kann. Die Schallwellen werden nämlich in elektrische Wellen und diese wieder zurück in hörbare Signale verwandelt. Durch eine solche Vorrichtung würde nicht nur die Gefahr von Zusammenstößen wirksamer vermieden werden als bisher, sondern die Schiffe könnten auch auf hoher See schon in sehr großen Abständen mit einander in Verbindung treten, wodurch es einem in Not befindlichen Schiffe leichter ermöglicht werden würde, noch rechtzeitig Hilfe herbeizurufen.

Anmerkung XXVII. Ueber ein neues Nebelsignal schreiben die „Bremer Nachrichten" unterm 1. Juni 1905 folgendes:

Wir haben bereits mehrfach über die erfolgreichen Versuche berichtet, welche in letzter Zeit mit den neuen Unterwasser-Glockenschallsignalen zwischen amerikanischen Feuerschiffen und dem Schnelldampfer des Norddeutschen Lloyd „Kaiser Wilhelm II." vorgenommen sind. Nachdem vor kurzem das Außenweserfeuerschiff als erstes in Deutschland mit einer solchen Unterwasserglocke ausgerüstet ist, sind solche Versuche jetzt auch an deutschen Küsten möglich.

Die Norddeutsche Maschinen- und Armaturenfabrik hatte zum 29. und 30. Mai eine große Anzahl von Interessenten zu einer Besichtigung der Empfangsapparate an Bord des Schnelldampfers „Kaiser Wilhelm II." nach Bremerhaven sowie zur Teilnahme an praktischen Versuchen mit dem Unterwasserglockensignal in der Wesermündung eingeladen. Etwa vierzig Herren

waren der Aufforderung gefolgt, darunter der Geh. Baurat Körte-Berlin, der erste, der in Deutschland Versuche mit Unterwasserschallsignalen angestellt hat, ferner Reg.-Rat. Truhlsen-Berlin, und als Vertreter des Reichsmarineamts Kapt.-Lt. Lustig, Referent für das Torpedoversuchswesen in Kiel; das holländische Marineministerium hatte den Generalinspekteur des holländischen Lotsenwesens de Vriese und Oberingenieur Kniphorst delegiert, die englische Regierung war durch den Marineattaché in Berlin, Kapt. z. See R. A. Allenby, vertreten. Am 29. Mai nachmittags fanden sich die geladenen Herren an Bord des im Kaiserhafen liegenden Schnelldampfers „Kaiser Wilhelm II." ein, wo ihnen durch den Erfinder des Apparates, Mr. Millet, und den Vertreter der Norddeutschen Armaturenfabrik, Herrn Noltenius, die Empfangsapparate vorgeführt und eingehend erläutert wurden.

Der Apparat besteht aus zwei wesentlichen Teilen, nämlich einer untergetauchten Glocke von besonderer Form, die dazu dient, den Schall unter Wasser hervorzubringen, und dem Empfänger, mit dessen Hilfe der von fern herkommende Schall gehört, und die Richtung desselben bestimmt werden kann. Die bisher mit dem Apparate erzielten Resultate berechtigen zu den besten Hoffnungen. Die Erfindung würde, wenn sie überall an den Küsten eingeführt wäre, in ihrer jetzigen, jedenfalls noch bedeutend entwicklungsfähigen Gestalt schon jetzt als eine wesentliche Verbesserung des Nebelsignalwesens zu bezeichnen sein. Darin waren alle Sachverständigen und Fachleute von vornherein einig, und die Versuche, die am 30. Mai während der Ausreise des Schnelldampfers „Kaiser Wilhelm II." nach Newyork gemacht wurden, befestigten dies einstimmige Urteil unbedingt. Kapt. Cüppers vom Schnelldampfer „Kaiser Wilhelm der Große" hatte vor acht Tagen bei voller Fahrt die ersten Töne vom Außenweserfeuerschiff her in einem Abstande von $4\frac{1}{2}$ Seemeilen schwach und bei einem Abstande von 4 Seemeilen sehr deutlich gehört. Diese Beobachtungen wurden gestern bei den Versuchen vom „Kaiser Wilhelm II." aus noch wesentlich übertroffen. Als das Schiff sich $7\frac{1}{2}$ Meilen vom Außenweserfeuerschiff (oberhalb der Tonne B) befand, glaubte Herr Kapitän Högemann das erste leise Tönen der Glocke durch den Hörer zu vernehmen und sofort wurde seine Wahrnehmung von anderen bestätigt. Je mehr der Dampfer sich dem Feuerschiffe näherte, desto lauter und deutlicher wurden die Töne. Es wurden nun mehrere kurze Manöver mit dem Dampfer vorgenommen, um zu zeigen, dass, je nach dem das Feuerschiff an Backbord- oder Steuerbordseite vom Dampfer lag, der Ton der Glocke jedesmal nach der entgegengesetzten Seite schnell schwächer wurde und bald überhaupt nicht mehr zu hören war.

Die Beobachtungen an Bord des „Kaiser Wilhelm II." erregten das höchste Interesse aller Anwesenden, die beim Außenweserfeuerschiff den prächtigen Dampfer verließen und auf den ebenfalls mit Empfangsapparaten ausgerüsteten Lloyddampfer „Seeadler" überstiegen, der sie sofort nach dem Feuerschiff brachte. Dort wurden die Unterwasserglocke, ihre Anbringung am Schiffe und ihr Betrieb besichtigt. Die Glocke war etwa $6\frac{1}{2}$ m tief ins Wasser hinabgelassen und wurde mit Dampfdruck betrieben. Sie schlug in kurzen Zwischenräumen jedesmal fünfmal an. Die Zahl der regelmäßigen Schläge kann beliebig vermehrt oder verringert werden. Die Glocken müssen tief herabgelassen sein, damit sie bei Seegang tunlichst unter Wasser bleiben. Es hat sich herausgestellt, dass 140 bis 150 Pfund schwere Glocken die geeignetsten sind. Sie müssen einen metallisch hellen Ton haben. Die Klöppel der Glocken werden durch Dampf-

kraft, hydraulisch, elektrisch oder durch Pressluft in Bewegung gesetzt. Auf diese Weise läßt es sich sehr einfach ermöglichen, die Unterwasserglocken benachbarter Feuerschiffe durch die Verschiedenheit ihrer Signale von einander zu unterscheiden.

Die vielen Versuche, welche mit Unterwasserglocken vorgenommen sind, liefern den Beweis, dass diese Signale unabhängig von dem Zustande der Atmosphäre und des Seeganges auf mindestens 4—5 Seemeilen vernommen werden können, und dass sich die Richtung der Schallquelle bei einiger Uebung innerhalb eines Striches genau festlegen läßt. Da die Erfindung noch verbesserungsfähig ist, ist eine Ausdehnung derselben auf Schiffe in Fahrt nicht unmöglich und vielleicht von unschätzbarem Werte. So erzählte uns Herr Kapt. Högemann, dass er das Schraubengeräusch passierender Dampfer vermittelst des Empfängers gehört und sogar die Umdrehungen der Schraubenflügel wahrgenommen habe, und gerade nach dieser Richtung hin läßt sich vielleicht die hochinteressante Erfindung für die Marine noch einmal zu einer ganz besonders wertvollen gestalten, ist es doch ohne Zweifel von ganz erheblichem Werte, wenn ein Geschwader auf solche Weise die Annäherung einer Torpedobootsdivision auf 4—7 Seemeilen feststellen kann.

Die Norddeutsche Maschinen- und Armaturenfabrik ist zur Zeit damit beschäftigt, ähnliche Installationen für die Elbe, wie auch für andere Feuerschiffe der Nord- und Ostseeküste herzustellen.

Von den Unterwasserglockensignalen wird (8. Aug. 1906) von einem neuen Erfolge berichtet, der um so erfreulicher ist, als dabei zum ersten Male ein in Deutschland auf Grund der bisherigen Erfahrungen hergestellter Glockenapparat verwendet worden ist. Der Norddeutsche Lloyd hatte seinen in Cherbourg stationierten Tender „Willkommen" mit einem von der Norddeutschen Maschinen- und Armaturenfabrik in Bremen konstruierten Glockensignalapparat ausgestattet; gleich der erste Versuch, der damit gemacht wurde, ist überraschend günstig ausgefallen. Als nämlich der Schnelldampfer des Norddeutschen Lloyd „Kaiser Wilhelm II." am 23. Juli bei Annäherung an Cherbourg stillliegen mußte, weil er wegen dichten Nebels die Einfahrt in den Hafen nicht finden konnte, horchte einer der Schiffsoffiziere an dem auf dem Dampfer befindlichen Glockensignalapparate, um eventuell die Schraubenschläge eines anderen Dampfers vernehmen zu können. Zu seiner Ueberraschung hörte er jedoch die charakteristischen Schläge eines Glockensignalapparates. Es waren die Unterwasserglocken des 15 Seemeilen entfernten Tenders „Willkommen". Der Dampfer änderte nun seinen Kurs und hielt direkt auf die Glockensignale zu, indem er die Richtung des Tenders innerhalb eines Striches bestimmen konnte. Mit Hilfe dieser Signale konnte er die Einfahrt in den Hafen von Cherbourg bewerkstelligen und gewann dadurch bedeutend an Zeit, während er sonst wegen des Nebels wohl mehrere Stunden vor der Einfahrt hätte liegen bleiben müssen.

Anmerkung XXVIII. Ueber auffällige akustische Durchlässigkeit und Undurchlässigkeit der Luft seien hier noch drei Fälle erwähnt. Der erste ist Archibald Forbes' „Erlebnissen aus dem deutsch - französischen Kriege" entnommen:

„Am Morgen des 5., vor 10 Uhr, war die von dichtem Nebel getrübte Luft zugleich mit einem Geräusche erfüllt, dem man keinen rechten Namen geben konnte. . . . Der nächste Morgen unterschied sich in jeder Weise vollständig von dem vorhergehenden. War der erste so kalt, dass einem das Mark in den Knochen fror, und so trübe, dass man auf 1/5 km nichts sehen konnte, so war der zweite klar, hell und warm wie ein später Märztag. Gestern war die Luft voll Geräusch, heute herrschte arkadische Stille, als ob kein Krieg wäre. Man sah sich staunend an. War Paris sammt seinen Befestigungen, Geschützen, dem Bombardement und Nichtbombardement der Ostseite spurlos verschwunden? . . . Ich beschloß, auf eigene Hand nachzusehen und ritt nach Montmorency, von wo aus die Ostseite von Paris sich als breites Panorama vor dem Beschauer ausbreitet. Noch immer war Alles totenstill. . . Ich traf dort drei berittene Soldaten und wir unterhielten uns über die Lage der Dinge. Sie glaubten an einen Waffenstillstand, weil sie seit dem Morgen keinen Schuß vernommen hatten. Während wir sprachen, löste sich eine einzelne weiße Rauchwolke aus der grauen Wand von La Briche. Keine Detonation — nach dem Fehlen jeglichen Geräusches zu schließen, hätte sie harmloser Dampf sein können. . . Ich ging allein weiter nach Gonesse. Dort fand ich zu meinem Erstaunen die deutschen Batterien von Gonesse bis Sevran in vollster Aktion. Sie waren seit 8 Uhr morgens im Gange. In Gonesse war man der Ansicht, das Feuern habe auf der Südseite zur selben Zeit begonnen; jedenfalls dauerte es noch fort. Dennoch hörte man in Margencey und Montmorency keinen Ton. Es kam alles von der Luft; heute leitete sie den Schall so schlecht, wie sie ihn gestern gut geleitet hatte. Sogar in Gonesse hörte man die Geschütze nicht, obgleich sie so zu sagen dicht neben uns donnerten."

Ueber einen zweiten Fall berichtet Ch. Pasquay dem „Prometheus" folgendes: „Auf dem Anwesen meiner Wärmeschutzmittelfabrik bei Wasselnheim im Elsaß hört man häufig bei völlig windstillem und fast immer bei klarem Wetter ganz aus der Nähe die Signalpfeife (Sirene) einer südwestlich gelegenen Papierfabrik zu Heiligenberg, deren Entfernung in der Luftlinie 11,5 km beträgt. Die Papierfabrik sowohl wie mein Anwesen liegen in etwa 210 m Meereshöhe; dicht hinter beiden erheben sich Hügelrücken auf 330 und 410 m, zwischen denen wieder eine Einsenkung bis auf 220 m herab sich hinzieht. Jedesmal nun, wenn man die Sirene bei uns hört, mag das Wetter noch so beständig aussehen, tritt innerhalb der nächsten 24 Stunden anderes Wetter ein, im Sommer Regen, im Winter meist Nebel. Es ist daher augenscheinlich, daß in diesem Falle eine warme, mit Feuchtigkeit gesättigte Luftströmung über der unteren Atmosphäre hinzieht, welche die Schallwellen nach unten reflektiert und nach Vermischung mit den unteren kälteren Schichten den Witterungswechsel herbeiführt. Am häufigsten hört man die Sirene natürlich morgens bei Beginn der Frühschicht, wo noch wenig andere Geräusche vorkommen; doch habe ich sie auch häufig schon mitten am Tage gehört und mit einer Deutlichkeit, als ob sie kaum 1 bis 2 km entfernt wäre."

Einen dritten Fall erzählte vor längerer Zeit der ungarische Naturforscher Professor Sajo. Mitten in der Pußta liegend, ist das Landgut dieses Gelehrten 1½ Kilometer von der nächsten menschlichen Ansiedlung, 10 Kilometer von dem nächsten Eisenbahnstrang, entfernt. Tiefe Stille umgab fast immer das ländliche Anwesen, in welchem bei der häufigen Abwesenheit des Gelehrten nur seine Gattin mit einigen Bediensteten und deren Familien wohnte. Wer beschreibt daher das Erstaunen, ja Entsetzen der einsamen Bewohner des Gutes, als an

einem Winterabende urplötzlich ganz nahe an den Häusern des Gehöftes ein so laut donnerndes Wagengerassel erscholl, als käme eine große Zahl schwerer Fuhrwerke in vollem Galopp gerade in den Hof gestürmt. Jung und alt fuhren auf und stürzten ins Freie, die Männer griffen zu den Waffen, da man irgend etwas Unerhörtes, mindestens einen räuberischen Ueberfall auf das Vieh, vermutete. Aber zum unaussprechlichen Staunen aller verstummte das Gerassel, wie es begonnen, die Pußta blieb lautlos und öde, und selbst am nächsten Morgen konnte die schärfste Untersuchung keine Wagenspur in dem weichen Sande entdecken.

Voll Grausen sandten die Leute alsbald den ältesten, sehr nüchternen und ehrenwerten Verwalter nach Budapest, um dem dort weilenden Herrn das Geschehnis zu melden und nachzufragen, ob ihm etwa ein Unglück zugestoßen sei. Sajo erinnerte sich sofort, dass ihm schon einmal seine Gattin von einem sonderbaren Dröhnen berichtet hatte, welches dicht unter den Fenstern des Hauses vorbeizog, aber trotzdem von den Leuten in dem wenige Schritte entfernten Dienstbotenhause nicht vernommen war. Damals hatte der Professor, trotz der bestimmtesten Versicherungen seiner Frau, an eine Sinnestäuschung geglaubt, aber jetzt stand das übereinstimmende Zeugnis sämtlicher Leute dem entgegen, und es blieb nur übrig, eine natürliche Erklärung für diese beinahe furchterregende Erscheinung zu suchen. Als solche blieb schließlich, bei der Plötzlichkeit und donnerartigen Stärke des Geräusches nur die Eisenbahn übrig, obwohl sie so weit entfernt liegt, dass der Lärm vorüberfahrender Züge auch von dem besten Gehör kaum jemals vernehmbar ist. Und nun ein donnerndes, betäubendes Gerassel, das geradezu die Häuser erzittern ließ. Der Wind konnte in beiden Fällen der Träger des Getöses nicht sein, da es sich bei stillem Wetter und dicht bewölktem Himmel hören ließ.

Der Forscher mußte schließlich mit der Erklärung zufrieden sein, dass wohl die Wolkendecke selbst, als ein ungeheurer und ausnahmsweise günstig gestalteter Reflektor, den Schall eines vorüberfahrenden Schnellzuges aufgenommen und scharf begrenzt in der Richtung auf das einsame Landgut zurückgeworfen hat. Er erinnert dabei an eine Naturerscheinung, die sich vor alter Zeit oftmals nächtlich in der Festung Ofen, der damals noch kleinen ungarischen Hauptstadt, hören ließ und unter der Bezeichnung „Der schwere Wagen" vielen Leuten bekannt war. Man hörte dann in den Häusern der Festung das Dröhnen und Rumpeln schwer beladener Lastwagen, die plötzlich durch die stillen Festungsgassen polterten. Aber vergeblich sah man sich nach diesen gespenstischen Fuhrwerken um. Die Straßen waren leer, und der Lärm verstummte eben so plötzlich, wie er aufgetreten war. Es waren wohl die Lastwagenkarawanen aus den Nachbarorten, die Nachts den Weg nach der Hauptstadt suchten, und deren Gerassel irgend ein geheimnisvoller Reflektor auffing, um es auf einige Minuten in die schlafenden Gassen der Festung zurückzuwerfen. Als später die Eisenbahn aufkam und die großen nächtlichen Frachtkarawanen aufhörten, verschwand auch der „schwere Wagen" aus den Ofener Gassen, und man hat ihn nie wieder gehört.

---

d) Schallleitung durch poröse Körper. (Schalldämpfer).

α) Beobachtungen.

Frage 889. Was können wir wahrnehmen, wenn der Schall aus der Luft in einen festen Körper übergeht?

Antwort. Wenn der Schall aus der Luft in einen festen Körper übergeht, so wird er stark geschwächt; da die Dichte des festen Körpers im allgemeinen einige tausend Male größer ist als die Dichtigkeit der Luft, so wird die Masse der an den festen Körper anstoßenden Luftwellen im Vergleich zu der Masse des festen Körpers eine nur verhältnismäßig geringe sein und sich demnach die Geschwindigkeit der Wellenbewegung wesentlich vermindern, denn durch den Stoß wird die gesamte Bewegungsgröße der Körper nicht geändert.

Erkl.. 821. Die Aenderungen, welche der Stoß in den Geschwindigkeiten zweier sich stoßenden Körper hervorbringt, hängen von den Massen und Geschwindigkeiten dieser Körper ab. Man nennt das Produkt Mc aus Masse und Geschwindigkeit eines Körpers seine B e w e g u n g s g r ö ß e. Das Gesetz der Bewegungsquantitäten lautet: Die Summe der Bewegungsgrößen zweier sich stoßenden Körper bleibt durch den Stoß unverändert. Bewegt sich ein elastischer Körper senkrecht gegen eine feste elastische Wand, so wird er mit derselben Geschwindigkeit in derselben Richtung zurückgeworfen oder reflektiert. (Siehe Lehrbuch der Percussion).

Frage 890. Was wird demnach in noch weit höherem Maße der Fall sein, wenn der Schall sich durch poröse oder durch distrakte (d. h. zerstreute) Stoffe, wie Watte, Sägemehl u. dergl. fortpflanzt?

Antwort. Bei seiner Fortpflanzung durch poröse oder distrakte Stoffe wird der Schall eine gewaltige Verminderung seiner Energie erfahren, indem die Bewegung längs der Wandungen der vorhandenen feinen Poren durch die Reibung naturgemäß gehemmt und in Wärme umgewandelt wird. Außerdem ist hier der Uebergang der sich entwickelnden Wärme von der Luft auf die festen Teile des Stoffes, und umgekehrt, wegen der großen Oberflächenausdehnung der Porenwandungen sehr erleichtert. Hieraus erklärt Rayleigh die

Erkl. 822. Während massives Holz ein sehr guter Schallleiter ist, ist das mit vielen Poren durchsetzte Korkholz oder das Sägemehl ein sehr schlechter Schallleiter. Analoge Erscheinungen sind die folgenden: Während eine Glasscheibe die Lichtstrahlen hindurchläßt, wird durch pulverisiertes Glas das Licht zurückgeworfen; und während ein massiver Metallstab ein guter

Elektrizitätsleiter ist, wirkt Metallpulver (wie z. B. bei der drahtlosen Telegraphie im Kohärer) wie ein Nichtleiter, welcher sich erst durch die auftreffenden elektrischen Wellen in einen Leiter umwandelt.

dämpfende Wirkung, welche solche porösen Stoffe und Gewebe auf die Schallwellen ausüben, und die besonders bei hohen Tönen auffällt.

Frage 891. Wie läßt sich experimentell nachweisen, dass der Fortgang der Schallwellen durch die in porösen Stoffen enthaltene Luft wesentlich erschwert und umkehrt das Leitungsvermögen dieser Stoffe durch Ausfüllen der Poren mit einer Flüssigkeit erhöht wird?

Erkl. 823. Eine Schallabsorption erfolgt, wenn die Schallwellen gedämpft und ganz oder teilweise in ungeordnete Schwingungen umgesetzt werden. Eine derartige Umsetzung erfolgt z. B., wenn man eine schwingende Stimmgabel in Wasser eintaucht, welches in demselben sichtbare Wirbelbewegungen erregt, die schließlich verschwinden und Wärme erzeugen. Wird die Schwingung einer Feder dadurch gedämpft, dass man sie mit einem weichen Stoffe berührt, so geht die Energie der Lamelle direkt in Wärme über. Eine Umsetzung der Schallwellen in Wärmebewegung erfolgt immer, gleichviel ob dieselben sich frei in der Luft ausbreiten oder ob sie eine poröse Wand durchdringen, nur erfolgt im letzteren Falle die Umwandlung in Wärme infolge der stärkeren Reibung viel früher, als bei der Reibung der Luftteilchen aneinander.

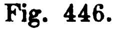
Antwort. Ein Stück Kattun, auf welches man eine mit einem kleinen hölzernen Fuße versehene Stimmgabel setzt, wird die Schwingungen der Gabel in der Regel nur in ganz geringem Maße auf den Tisch übertragen, auf welchem das Gewebe liegt. Feuchtet man dieses aber an, so wird die Uebertragung der Schwingungen auf den Tisch stärker, und damit auch der Ton deutlicher. Dasselbe ist zu bemerken, wenn man die Gabel auf eine Schicht von sehr feinem Sand stellt, der sich bei gelindem Anfeuchten mehr wie ein festes Ganze verhält. Durch die Reibung der trockenen Sandkörner geht mehr von der Schallenergie verloren. Macht man den Sand durch und durch naß, wodurch die Bewegung der Körnchen wieder erleichtert wird, so ist die Uebertragung des Schalles wieder weniger kräftig.

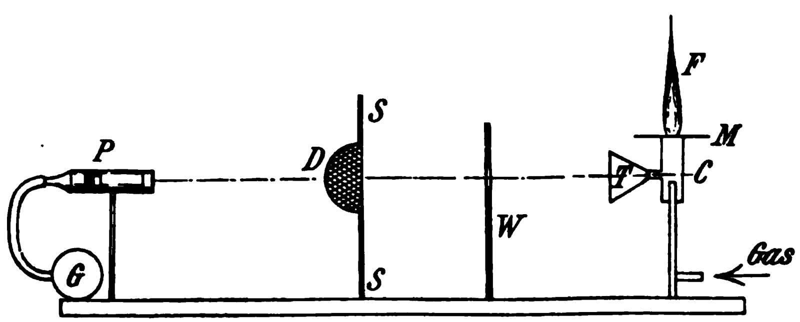
Frage 892. Da die Verbreitungsgeschwindigkeit des Schalles in porösen Körpern, ebenso wie in engen Röhren, geringer ist als

Antwort. N. Hesehus hat die Brechung des Schalles in porösen Körpern mit einer bikonvexen

im freien Luftraume, so muß in solchen Körpern auch Schallbrechung (siehe Akustik I. Bd., Seite 77) stattfinden. In welcher Weise ist dies von N. Hesehus nachgewiesen worden?

Linse aus Metallnetz, die möglichst gleichmäßig mit Watte gefüllt war, nachgewiesen. Für Versuche eignet sich folgende Einrichtung: Ein halbkugelförmiges eisernes Drahtnetz D (Fig. 446) von 24 cm Durchmesser (wie man es für hauswirtschaftliche Zwecke benutzt), wird durch ein flaches Drahtnetz geschlossen und der Innenraum mit Daunen oder kleinen Ebonitspänen ausgefüllt. Die Linse wird darauf in einen größeren Schirm S aus Karton eingepaßt. Als Schallquelle dient eine Pfeife P, bei der die Höhe des Tones durch Drehung einer Schraube verändert und zugleich gemessen werden kann, während der Ton durch Druck auf einen Gummiball G erzeugt wird. Um das Vorhandensein des Schallbrennpunktes nachzuweisen, wur-


Fig. 446.



de eine empfindliche Flamme F nach Govi benutzt, bei der das Leuchtgas über einem Metallnetze M angezündet wird, das sich in einiger Höhe über der Ausströmungöffnung befindet. Der untere Teil des Gases ist gegen die Einwirkung von Luftströmungen oder fremden Tönen durch einen Metallzylinder C geschützt, in den die zu untersuchenden Schallwellen nur durch eine kleine

Erkl. 824. Bei einem Versuche mit 76 g Daunen ergab sich eine Brennweite von 19,5 und eine Schallgeschwindigkeit von 211 m; bei einem zweiten Versuche mit 166 g Daunen in demselben Raume, war $F = 16{,}5$ und $c = 197$; bei beiden Versuchen war die Tonhöhe der Pfeife ungefähr 6960. Es zeigt sich demnach, dass mit wachsender Dichtigkeit des porösen Mediums die Schallbrechung zunimmt, die Schallgeschwindigkeit dagegen entsprechend abnimmt.

Aehnliche Versuche mit Kautschukspänen führten zu einer Schallgeschwindigkeit von nur 46 m bei einer Wellenlänge von 60 mm. Diese Schallgeschwindigkeit ist noch bedeutend kleiner als die von Schneebeli (1869) mit einer mit Tuch gefütterten Röhre erhaltenen von 253 m; Krajewitsch dagegen fand (1885) in einer eben solchen Röhre von 3 mm Durchmesser bei einem Luftdrucke von 2,2 mm nur $c = 82$ m.

Auf Grund einer großen Reihe von Versuchen stellt Hesehus eine empirische Formel für den Zusammenhang der Schallgeschwindigkeit mit der Wellenlänge und der Dichte des Mittels auf, und findet daraus, dass die wahrscheinlichste Schallgeschwindigkeit in freier trockener Luft 332,3 m ist. Dieser Wert stimmt mit dem von Moll und van Beck (1825) gefundenem Werte (332,8 m) überein, da dieser sich bei Einführung des Regnault'schen Ausdehnungskoeffizienten der Luft auf 332,25 reduziert.

seitliche, nötigenfalls noch mit einem Glastrichter T versehene Oeffnung eintreten. Wenn der Versuch gut gelingen soll, muß man über konstanten und regulierbaren Gasdruck verfügen, was man am leichtesten erreicht, indem man das Gas in einen Kautschuksack füllt. Der konvexen Linsenfläche wird die Schallquelle gegenüber aufgestellt, an der andern Seite stellt man eine Scheidewand W auf, welche nur die zentralen Schallstrahlen durchläßt. Ist die Empfindlichkeit der Flamme passend gewählt, so hört sie auf, sich zusammenzuziehen, sobald die Entfernung der Pfeife sich ändert, man kann daher zu einem bestimmten Abstande f der Flamme einen Abstand f' der Röhre zuordnen, beide Abstände von der Mitte der konvexen Oberfläche aus gerechnet. Durch diese beiden Größen ist die Brennweite F bestimmt.

Anmerkung XXIX. Die in den Jahren 1901 und 1902 von dem Amerikaner Tuffs angestellten Versuche über den Durchgang von Tönen durch poröse Stoffe ergaben das von vornherein zu erwartende Resultat: Der Widerstand, den körnige Materialien der hin- und hergehenden Bewegung der Luftteilchen in einer Schallwelle entgegenstellen, ist unter sonst gleichen Bedingungen proportional der Dicke des Materials.

Sollen Schallwellen (z. B. von Telephonkammern) abgehalten werden, so können nach Tuffs nur Materialien in Betracht kommen, welche die Luft nicht durchlassen, also nicht porös sind. Bei ihnen muß die Uebertragung entweder so stattfinden, daß der Schall sich als elastische Welle in der Substanz der Wand fortpflanzt, oder dass er die Wand als Ganzes in hin- und hergehende Schwingungen versetzt. Eine Bleiplatte pflanzte den Schall besser fort, als eine gleich dicke Glasscheibe, und mit Paraffin getränkte Scheiben aus Leder ließen infolge ihrer stärkeren Ausbiegung den Schall viel besser durch als gleich dickes Fichtenholz. Versuche mit drei paraffinierten Pappscheiben, die unmittelbar aufeinander lagen, und drei gleichen, die durch je eine Luftschicht getrennt waren, ergaben eine bessere Leitung des Schalles seitens der durch Lufträume getrennten Scheiben, was mit der allgemein verbreiteten Annahme von dem Isolationsvermögen der Luftschichten im Widerspruche steht.

Von Scheiben, welche gleiche Starrheit, d. i. gleiches Ausbiegen der Mitte besaßen, war die mit der größeren Masse ein schlechterer Leiter des Schalles. Die Wirkung der Massenzunahme ist aber vielmal kleiner als die Wirkung der

zunehmenden Starrheit. — Die Schallübertragung findet durch ein Hin- und Herschwingen der Wand selbst und nicht durch eine elastische Welle statt, welche sie durchzieht.

Akustische Untersuchungen von H. Sieveking und A. Behm über den Durchgang des Schalles durch feste und poröse Körper (Annalen der Physik, 15. Bd. 1904) ergaben, dass Stoffproben, welche häufig als Schallisolatoren verwendet werden, auffallenderweise nur einen ganz unvollkommenen Abschluss gegen den Schall gewähren. Ihre Durchlässigkeit betrug in vielen Fällen über 90 Prozent. Wurden die Stoffe mit Wasser getränkt, so ergab sich eine Durchlässigkeit von 60 bis 70 Prozent. Doch ließ sich dies nur erreichen, wenn man vielfach zusammengelegte Stoffe nahm. Wie groß die Durchlässigkeit solcher Stoffe im allgemeinen ist, zeigt sehr gut der Filz, der sich mit Unrecht großer Beliebtheit als Schallisolator erfreut. In einer Schichtstärke von 3 cm verminderte derselbe die Schallintensität von 100 auf 81 Prozent. Nach einer einmaligen Pressung der Filzplatte zeigte sich eine Durchlässigkeit von 42 Prozent. Die gute Durchlässigkeit der porösen Substanzen beruht also in erster Linie auf dem direkten Luftdurchgange; beseitigt man die Luft in den Körpern durch Flüssigkeit oder starke Pressung, so stellt sich auch ein relativ gutes Isoliervermögen ein.

Allgemein ergibt sich, dass die Durchlässigkeit im umgekehrten Verhältnis zu der Dichte des Körpers steht. Der Widerspruch dieses Gesetzes mit praktischen Erfahrungen erklärt sich daraus, dass es sich in den meisten Fällen nicht um die direkt von der Schallquelle ausgehende Luftwelle handelt, sondern fast immer um die Schwingungen fester Körper, die selbständig wieder Schallwellen in der benachbarten Luft erzeugen. Eine Schallisolation ist praktisch nur durch komplizierte Anordnungen möglich, die 1) jeden Uebergang der direkten Schallwelle und 2) jede Schwingung der festen Körper als ganzes möglichst ausschließen. Korkstein gehört zu den bewährtesten Isolatoren, da er in besonders hohem Grade die Fähigkeit besitzt, den Stoß zu absorbieren und somit die Uebertragung der Schwingungen an feste Körper zu verhindern. Die Korksteinplatten werden aus grob gemahlenem Kork unter Anwendung eines Bindemittels hergestellt, und zwar p o r ö s , als gewöhnlicher Korkstein und w e n i g e r porös als imprägnierter Korkstein. Die letztere Plattensorte wird hergestellt, indem die gewöhnlichen Platten mit einer pechartigen Masse imprägniert werden.

β) Anwendungen der Schalldämpfer.

Frage 893. Wo findet die dämpfende Wirkung, welche poröse Stoffe und Gewebe auf die Schallwellen ausüben, praktische Anwendung?

Erkl. 825. Die Vibrationen, welche die Maschinen und Transmissionen beim Gange selbst hervorrufen, pflanzen sich durch die Träger, Mauern und Fundamente um so leichter fort, je fester und härter die letzteren sind;

Antwort. Die dämpfende Wirkung poröser Stoffe und Gewebe findet überall da praktische Anwendung, wo es notwendig ist, die weitere Fortpflanzung des Schalles möglichst zu verhindern, oder doch merklich abzuschwächen. So z. B. wendet man mit Watte und Tuch gepolsterte Türen an, um zu vermeiden, dass die in dem einen

insbesondere sind aber die Eisenkonstruktionen der modernen Fabrikgebäude gute Fortleiter für Schall und Erschütterung, da dieselben leicht in Mitschwingungen versetzt werden. Als die besten Mittel gegen die Schallübertragung sind Filz und Kork im Gebrauch, bei deren Anwendung darauf zu achten ist, dass nicht nur die Maschine selbst gegen ihren Standort schalldicht gemacht wird, sondern es müssen vor allem auch die Befestigungsbolzen gegen das Mauer- oder Trägerwerk isoliert werden, damit diese die Erschütterung nicht übertragen können, denn sonst ist die ganze Isolierung wertlos. In jedem Falle ist dafür Sorge zu tragen, dass der Druck auf die Flächeneinheit ein möglichst geringer ist; es müssen also große Unterlagsflächen geschaffen werden. Je mehr die elastische Unterlage durch den auf ihr lastenden Druck zusammengepreßt wird, um so mehr vernichtet man ihre Elastizität und damit zugleich ihre schalldämpfende Wirkung.

Kraftmaschinen werden lautlos gemacht, indem der Boden des Fundamentschachtes zunächst mit Isoliermaterial ausgelegt wird. Auf diesem wird der Fundamentalklotz aufgemauert, die Ankerbolzen in ihn eingelassen (ohne dass sie die Isolierschicht durchdringen) und auf dem Fundamente die Betriebsmaschine in der üblichen Weise aufgestellt. Dabei ist der ganze Fundamentklotz einschließlich des Isoliermaterials von einem Luftschacht umgeben.

Raume gesprochenen Worte in dem Nebenzimmer gehört werden. Demselben Zwecke dienen doppelte Fußböden, welche mit irgend einem Schallisolator ausgefüllt, die in den obern Räumen eines Gebäudes erregten Schallwellen nach unten hin dämpfen sollen. Auch gehört hierher die Anwendung elastischer Lederkissen und Gummipolster, welche zur Abschwächung heftiger Stöße benutzt werden und somit den Schall schon im Entstehen ersticken sollen.

Ganz besonders notwendig ist aber die Schalldämpfung in Fabrikgebäuden, wo der Lärm der Betriebs- und Arbeitsmaschinen für die ganze Nachbarschaft oft sehr störend wirkt. Man benutzt deshalb zur Fundamentierung solcher Maschinen irgend einen elastischen Körper, wie Holz, Kork, Faschinen, Asphalt, Federn, Filz, Leder oder am besten Kautschuk. Letzterer gibt den meisten Nutzen, weil er die größte Elastizität besitzt und sich allen Verhältnissen leicht anpassen läßt.

Frage 894. Inwiefern findet die schalldämpfende Wirkung poröser Stoffe auch bei dem gebräuchlichsten aller musikalischen Instrumente, bei dem Pianoforte Anwendung?

Erkl. 826. Während das weiche Hammer- und Dämpfermaterial mit den Saiten in Berührung tritt, und einerseits den Ton bilden hilft, andererseits

Antwort. Die älteren Tafelklaviere und auch unsere Pianinos haben zweierlei Dämpfervorrichtungen, nämlich die allen Klavieren, auch den Flügeln gemeinsamen Dämpfer, bestehend aus einem mit feinstem Filz belegten Holzklötzchen, welches nach Loslassen der Taste den Ton sofort erstickt, und eine zweite Art, die

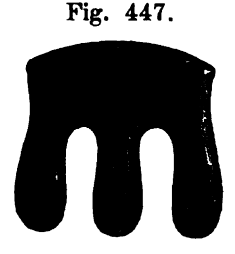
ihn verstummen macht, sind an zahlreichen anderen Stellen Tuch oder Leder angebracht, um kein anderes Geräusch daneben aufkommen zu lassen, so dass der Gang des Mechanismus selbst ein völlig unhörbarer wird. Ueberall also, wo zwei harte Teile des Mechanismus in Berührung treten, befindet sich eine Belegung mit Tuch oder dergleichen zur Dämpfung des möglichen Geräusches, so unter den Tasten zunächst vorn am Niederdruck, dann in der Mitte, wo die Schlitze mit Tuch gefüttert sind, in welche die Wagestifte eintreten, am hintern Ende der Taste sowohl unterhalb als nach Erfordern oberhalb desselben. An der Auslösung für die Stoßzunge, wie an der Kröpfung der Hammernuss, wogegen die Zunge spielt, ist eine besonders gute Belegung erforderlich. Ebenso sind die Backen der sog. Kapseln ausgetucht, in denen sich die Hammernuß an ihrem Stifte dreht. Die Hämmer fallen auf eine gepolsterte Leiste zurück, ja selbst enge Löcher werden ausgetucht, in welchen ein Draht, etwa zur Hebung des Dämpfers, spielen soll. Die Hammerfänger sind stets mit weichem Leder überzogen, so dass hier zwei weiche rauhe Körper miteinander in Berührung kommen, wie es dem Zwecke sofortiger Beruhigung des Hammers entspricht.

durch ein besonderes Pedal regiert wird und nur ausgiebige Schwingungen der Saite verhindert, kleine dagegen zuläßt. Diese letztere Art der Dämpfung ersetzt die Verschiebung der Flügel, gibt aber einen durchaus abweichenden Effekt.

Die Abdämpfung der nachklingenden Saiten geschah anfänglich auf unvollkommene Weise durch eingeflochtene Tuchstreifen. Die Belegung der Hämmer sowohl als der Dämpfer verlangt die größte Sorgfalt und das vollkommenste Material, wenn der Ton im Laufe der Zeit nicht durch Veränderung jener Bestandteile, wie Härterwerden u. dergl. an seinem ursprünglichen Charakter verlieren soll. Früher, wo man nur Schafleder und Baumwollenzeug für diese Zwecke kannte, waren dergleichen Uebelstände unvermeidlich. Ein großer Fortschritt war es daher, als man, zuerst in England, für Hämmer und Dämpfer besondere Filze herstellen lernte.

Frage 895. Wie sind die Dämpfer der Streichinstrumente eingerichtet, und wodurch unterscheiden sich dieselben wesentlich von den dämpfenden Mitteln, welche beim Pianoforte Anwendung finden?

Fig. 447.



Antwort. Die Dämpfer der Streichinstrumente sind ähnlich wie der Steg geformte Holzkämmchen (siehe Fig. 447) mit gespaltenen Zinken, welche auf den Steg fest aufgeklemmt werden. Dieselben vermögen zwar nicht ein starkes Schwingen der Saiten zu verhindern, da dieses vom Angriff des Bogens abhängt; wohl aber modifizieren sie stark die Uebertragung der Schwingungen durch den Steg auf den Resonanzboden. Der Timbre (d. i. die Klangfarbe) des gedämpften Klanges der

Fig. 448.



Streichinstrumente ist ein ganz anderer als der des freien und hat etwas an den Klang der Oboe gemahnendes, ein wenig Näselndes, das im Piano traumhaft verschleiert und im Mezzoforte seltsam gedrückt, wie aus Fesseln sehnend sich losringend klingt.

C. G. Schuster (Musikinstrumenten- und Saiten-Manufaktur in Markneukirchen, Sachsen) hat einen Violindämpfer am Saitenhalter konstruiert, dessen Hauptvorzug darin besteht, dass der gedämpfte Ton vollkommen klar und rein bleibt und nicht näselnd wird, wie dies bei anderen Dämpfern häufig der Fall ist. Diese neue Dämpfervorrichtung (Figur 448), läßt sich sehr leicht und bequem handhaben und verunziert in keiner Weise das Instrument. Die Dämpfung, die sich gleichmäßig auf alle vier Saiten verteilt, erfolgt gegebenen Falls augenblicklich durch Vorwärtsschieben des an der rechten Seite befindlichen Hebels und wird aufgehoben durch Rückwärtsbewegen desselben. Eine Stellschraube ermöglicht den Dämpfer in richtiger Entfernung zum Stege einzustellen.

Frage 896. Welcher Art sind die für Blechinstrumente gebräuchlichen Dämpfer?

Erkl. 827. Das Stopfen der Horn- und Trompetentöne (siehe II. Band der Akustik) mit der Hand ist auch Dämpfung, und die dadurch hervorgerufene Veränderung der Klangfarbe dem entsprechend. Der Klang der Trommeln wird gedämpft durch Einschalten eines Tuchstreifens oder dergl. zwischen die Schnarrsaite und das Fell, der Klang der Pauken durch Berührung des Felles mit der Hand.

Antwort. Für die Blechblasinstrumente gebraucht man als Dämpfer durchbohrte Holzkegel, die in die Stürze eingeschoben werden und den Timbre stark verändern durch Hemmung der Molekularschwingungen des Blechkörpers selbst, aber zugleich als halbe Deckung wirken, d. h. die Tonhöhe etwas verändern; ihre Anwendung ist darum eine mißliche, und man hat neuerdings kompliziertere Dämpfer konstruiert.

---

e) Akustische Bewegungserscheinungen.

Frage 897. Um die in einem Körper enthaltene Wärmemenge zu bestimmen, benutzen wir das allbekannte Thermometer; zur Vergleichung der Lichtstärken zweier verschiedener Lichtquellen bedienen wir uns verschiedener Photometer und zum Messen galvanischer Ströme dienen Galvanometer; wie steht es nun in dieser Beziehung mit der Feststellung und Vergleichung verschiedener Schallintensitäten?

Eig. 449.



Erkl. 828. Das Helmholtz'sche Membranpendel zeigt folgende Einrichtung: A, Fig. 449, ist eine Glasflasche, deren Mündung bei *a* offen ist, ihr Boden bei *b* ist weggesprengt, und an seiner Stelle eine Membran (nasse Schweinsblase, die man, nachdem sie aufgezogen und befestigt ist, trocknen läßt) aufgespannt. Bei *c* ist mit Wachs ein Kokonfädchen befestigt, welches ein Siegellacktröpfchen trägt. Letzteres hängt wie ein Pendel herab und legt sich gegen die Membran. Sowie die Membran in Schwingungen gerät (wenn man z. B. ihren Grundton in der Nähe angibt) macht das Pendelchen die heftigsten Sprünge.

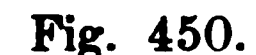
Antwort. Es besteht bis jetzt keine Einheit der Schallintensität, welche wir akustischen Messungen zugrunde legen könnten, und es gibt bis jetzt auch kein Instrument, kein Phonometer, mit welchem wir verschiedene Schallstärken genau messen und miteinander vergleichen könnten. Durch das Helmholtz'sche Membranpendel (siehe Erkl. 828) und die sensitiven Flammen (siehe II. Bd. der Akustik) sind nun wohl Mittel geboten, sehr schwache Töne noch zu erkennen und nach ihrer Intensität abzuschätzen; allein ein genaues Maß bieten dieselben nicht. Noch weniger vermag unser Ohr ohne Hilfsmittel das Verhältnis der Stärke verschiedener Schalle zu bestimmen; es ist nur imstande, zwei Schalle als verschieden stark zu erkennen, wenn dieselben in ihren Intensitäten um ca. 25 Prozent verschieden sind. Ueberdies ist die Schärfe unseres Gehörs an verschiedenen Tagen nicht die gleiche und bei verschiedenen Personen auch nicht dieselbe; oft hören wir auf einem Ohre besser als auf dem andern, und die hohen Töne erregen unser Ohr stärker als die tiefen Töne.

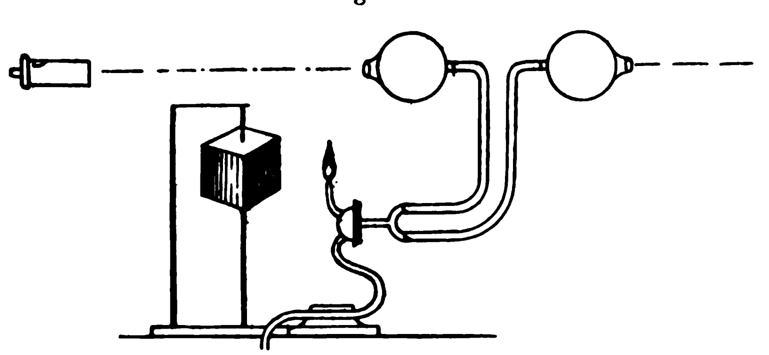
Frage 898. Da die Empfindlichkeit unseres Gehöres mit der Tonhöhe wächst, so müßte man bei Herstellung eines Phonometers darauf achten, Tonquellen von derselben Höhe mit

Antwort. In gleicher Entfernung von den beiden miteinander zu vergleichenden Tonquellen sind zwei Resonatoren aufgestellt (s. Erkl. 829), die auf den Ton der

einander zu vergleichen. In der Tat hat Alfred Mayer (1873) einen solchen Apparat erdacht, durch welchen wenigstens die Intensitäten zweier Töne von gleicher Höhe in welcher Weise miteinander verglichen werden können?

Tonquellen abgestimmt sind, und von welchen zwei Röhren, deren Längenunterschied gleich der halben Wellenlänge des Tones ist, nach einem hufeisenförmigen Rohre führen, welches in seiner Mitte eine Königsche Flammenkapsel (siehe II. Bd. der Akustik,


Fig. 450.



S. 216) trägt. Tönt nur eine Tonquelle, so entstehen in dem vor der Kapsel befindlichen rotierenden Spiegel die bekannten Flammenbilder mit Zacken; tönt auch die andere in gleicher Stärke, so heben sich die Schwingungen auf, die Flamme der Kapsel bleibt in Ruhe und zeigt in dem rotierenden Spiegel das Aussehen eines zusammenhängenden leuchtenden Bandes. Sind aber die Töne nicht von gleicher Stärke, so verschwinden die Zacken nicht; sie verschwinden erst dann, wenn die stärkere Tonquelle so weit entfernt wird, dass durch die Entfernung ihre Intensität der der schwächeren gleich geworden ist.

Erkl. 829. Sehr empfindlich für schwache Töne sind die von Helmholtz angegebenen R e s o n a t o r e n, welche zur Verstärkung der Tonempfindung dienen, und in den Figuren 451 und 452 dargestellt sind. Es sind dies gläserne oder metallene Hohlkugeln oder Röhren aus Pappe, mit zwei Oeffnungen, von welchen die eine *b*, so geformt ist, dass man sie in das Ohr einführen kann. Ein solcher Resonator ist

Fig. 451.



der oben beschriebenen Resonanzflasche (Fig. 449) sehr ähnlich, nur dass hier anstelle der dort angewendeten künstlichen elastischen Membran das Trom-

Fig. 452.



Wenn eine und dieselbe Tonquelle n mal so weit entfernt wird, so klingt sie (nach Antwort 862)

melfell des Beobachters tritt. Hat man sich das eine Ohr verstopft und setzt an das andere einen solchen Resonator, so hört man die meisten Töne, welche in der Umgebung hervorgebracht werden, viel gedämpfter als sonst; wird dagegen der Eigenton des Resonators angegeben, so schmettert dieser mit gewaltiger Stärke in das Ohr hinein.

Erkl. 830. Weber schlug schon (1846) als Grundgedanken eines Phonometers vor, die Schallschwingungen in elektrische Ströme zu verwandeln und deren Stärke zu messen. Hiervon angeregt, benutzte Oberbeck (1882) ein Mikrophon, das mit einem Galvanometer in einen Stromkreis eingeschaltet war und durch die vom Schalle bewirkten Kontaktänderungen des Mikrophons die Schallstärke aus den Nadelablenkungen erkennbar machte.

n^2mal so schwach; wenn daher eine andere Tonquelle in n-facher Entfernung eben so stark klingt, so muß sie n^2mal so stark sein. Man entfernt demnach die eine Tonquelle so weit, bis die Zacken verschwinden; dann verhalten sich die zwei Tonstärken wie die Quadrate der Entfernungen von dem Flammenzeiger.

Frage 899. Wir haben bereits erfahren, dass die von einer Tonquelle ausgehenden Schallwellen andere Körper (Membranen, sensible Flammen, Resonanzböden)

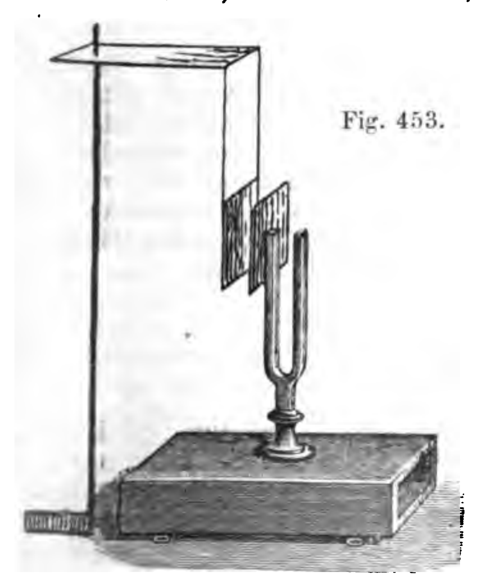


Fig. 453.

in Schwingungen versetzen können; allbekannt ist auch, dass durch sehr heftige Wellenbewe-

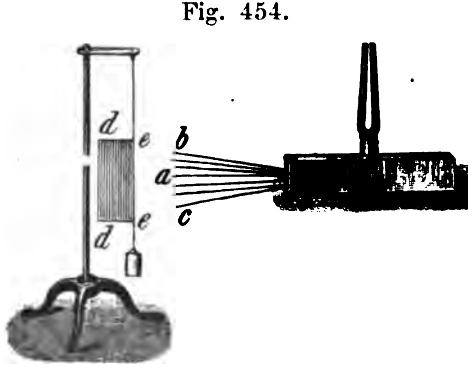
Antwort. Guyot beobachtete eine Erscheinung, die wir in folgender Weise zeigen können. Eine kleine Scheibe aus Kartonpapier oder dünnem Metall wird an dem einen Schenkel einer großen Stimmgabel befestigt, so dass die Ebene der Scheibe senkrecht zur Schwingungsrichtung steht. Hängt man nun parallel zur Scheibe und in geringem Abstande zu ihr ein Blatt Papier von nahezu derselben Größe auf, so bewegt sich dieses gegen die schwingende Scheibe hin, so dass es den Anschein hat, als ob es von der Scheibe angezogen würde. Guyot fand zugleich, dass bei diesem Versuche unter Umständen auch eine Abstoßung erfolgen kann, nämlich, wenn das beweglich aufgestellte Objekt spezefisch leichter ist als die umgebende Luft. Schellbach sprach den Satz so aus: Die Schallwellen eines elastischen Mittels ziehen spezifisch schwerere Körper

gungen (z. B. durch einen Kanonenschuss oder eine Explosion) mechanische Wirkungen, Zertrümmerung von Glasscheiben usw. hervorgebracht werden. Weniger bekannt dagegen sind eine Anzahl von Versuchen mehrerer Physiker, durch welche mittelst Schallwellen Bewegungen bewirkt werden, aus deren Größe wir die Schallintensität zu beurteilen vermögen. Welche hierher gehörige Erscheinung wurde zunächst (im Jahre 1834) von Guyot beobachtet?

nach dem Mittelpunkte der Erschütterung und stoßen spezifisch leichtere ab; z. B. ein luftgefüllter Ballon von Goldschlägerhaut wird an der offenen Seite des Resonanzkastens einer tönenden Stimmgabel angezogen, ein wasserstofferfüllter abgestoßen.

Frage 900. In welcher Weise zeigte auch Dvorak (sprich: Dvorschak), dass solche Bewegungen nicht nur in der Nähe schwingender fester Körper auftreten, sondern auch durch Schallwellen luftförmiger Körper erregt werden können?

Fig. 454.



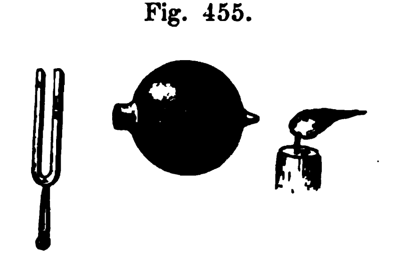
Antwort. Ein an einem Kokonfaden hängendes, leichtes Kartenblättchen stellt sich axial zur Richtung des Schallstrahls *a* einer klingenden Stimmgabel, denn falls das bei *e e* aufgehängte Blättchen sich mit der Seite *d d* gegen *b* oder *c* bewegen wollte, würde es durch die Schallstrahlen oder die vom Resonanzkasten ausgehenden Verdichtungsstöße in die Richtung *d e* zurückgetrieben.

Die Abstoßung einer leichten Gasmasse zeigte Dvorak mit Hilfe einer kleinen Seifenblase oder mit einem leichten Kollodiumballon, der mit Leuchtgas gefüllt, vor die Oeffnung des Resonanzkastens einer kräftig tönenden Stimmgabel gebracht wurde.

Frage 901. Welchen Versuch führte Rayleigh mittelst eines Resonators, einer Stimmgabel und einer Kerzenflamme aus?

Antwort. Rayleigh entdeckte, dass, wenn eine schwingende Stimmgabel vor die Mündung eines Resonators gehalten wird, ein Luftstrom aus der jener Mündung diametral gegenüberliegenden kleinen Oeffnung heraustritt. Dieser Strom kann so stark werden, dass er eine Kerzenflamme auszu-

Fig. 455.



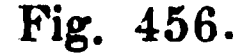
blasen vermag. Dass die Erscheinung nicht durch die Stöße der schwingenden Stimmgabel verursacht wird, sondern durch die Schallschwingungen der Luft, wurde dadurch nachgewiesen, dass man bei einem zweiten Versuche die Oeffnung des Resonanzkastens der Stimmgabel vor die Mundöffnung des Resonators hielt, wobei man dieselbe Beobachtung machte.

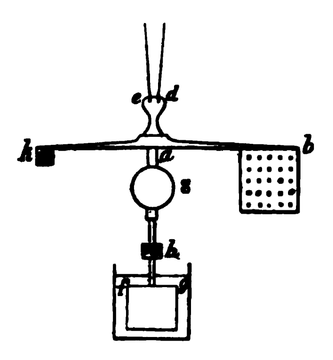
Bringt man eine Stimmgabel auf einem Resonanzkasten, dessen Mündung sich etwas verengt, durch einen kräftigen Bogenstrich zum Tönen, so wird (ohne Anwendung eines Resonators) eine Kerzenflamme von der Oeffnung des Resonanzkastens stark abgestoßen, und verlöscht wie durch einen Luftstrom.

Frage 902. In welcher Weise hat Dvorak nachgewiesen, dass die Gestalt der kegelförmigen Resonatormündung, durch welche die Luftwellen ihren Weg nehmen, von wesentlichem Einflusse auf den bei derartigen Bewegungen eintretenden Luftwiderstand ist?

Erkl. 831. Ein analoger (von Dvorak angegebener) Versuch ist der folgende: Ein Holzspahn *a b* (Fig. 459) hat in der Mitte bei *c* ein Glashütchen, das auf eine Nadelspitze gestellt wird. Auf einer Seite befestigt man ein Stück steifen Papiers *P*, auf der andern ein kleines Gegengewicht. Bringt man *P* nahe an die Mündung eines konischen Rohres von Blech oder starker Pappe, das wie ein Horn angeblasen wird, so wird es stark angezogen. Bläst man dagegen einfach durch das Horn, ohne einen Ton zu erzeugen, so wird die Papierscheibe von dem Luftstrome mitgenommen.

Antwort. Dvorák fand, dass ein mit etwa 20 konischen Löchern versehenes Kartonstückchen (oder dünne Pappe) durch eine starke Tonquelle abgestoßen wird, wenn die engere Seite der Löcher der Schallquelle zugewandt ist; jedoch soll die Entfernung recht klein und der Ton sehr stark sein. Von dieser Erscheinung machte er Gebrauch zur Konstruktion einer Torsionswage (Fig. 456) deren Hebel *kb* bifilar aufgehängt ist und an seinem einen Ende eine Kartonscheibe *b* mit konischen Löchern trägt; außerdem ist an dem Apparate noch ein Gegengewicht *h* und ein Dämpfer *fg* angebracht. Die Ablenkungen beobachtet man mit Hilfe des Spiegels *S*, und aus der Größe derselben läßt sich dann die Intensität der Luftschwingungen ermitteln oder doch vergleichen.


Fig. 456.



Auf demselben Prinzipe beruht auch das von Dvorák angefertigte Schallradiometer. Dasselbe besteht aus 4 konisch durchbohrten kleinen Scheiben (Flügeln), welche vertikal an den Armen eines auf einer vertikalen Spitze drehbaren leichten Kreuzes befestigt sind. Bläst man nun durch ein kegelförmiges Horn, ohne einen Ton zu erzeugen, so ist der Luftstrom bedeutend stärker, als wenn das Horn tönt, erzeugt aber trotzdem keine Drehung. Stellt man das Radiometer so wie es die Figur 457 von oben gesehen zeigt, wobei der Flügel *a b* die breite Seite der Löcher dem Horne zukehren muß, so rotiert das Radiometer dem Luftstrome entgegen, sobald das Horn zum Tönen gebracht wird.

Fig. 457.

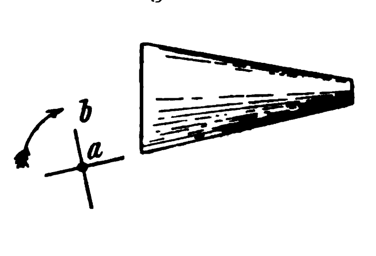
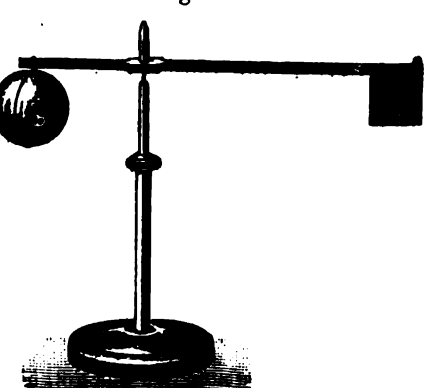
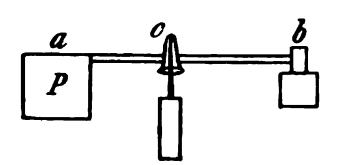


Fig. 458.



Um derartige akustische Anziehungen und Abstoßungen zu zeigen, benutzt man mit Vorteil den in Figur 458 dargestellten Apparat. Bei demselben ist zur leichten Bewegung der horizontale Holzstab mit einem Glashütchen versehen, welches auf ein Stativ gestellt wird. An der einen Seite ist ein Kugelresonator, auf der andern ein gelochtes Aluminiumblättchen befestigt.

Fig. 459.



Frage 903. Wie äußert sich die Wirkung einer kräftigen Tonquelle (nach Dvorák's Entdeckung) auf einen leicht beweglichen Resonator?

Fig. 460.

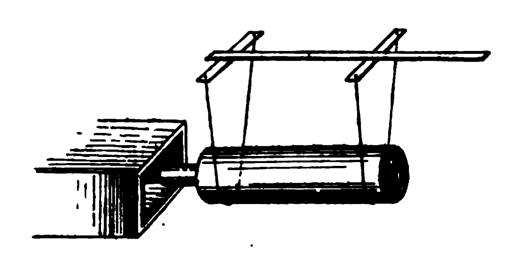


Fig. 461.

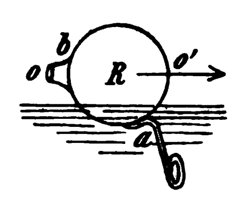
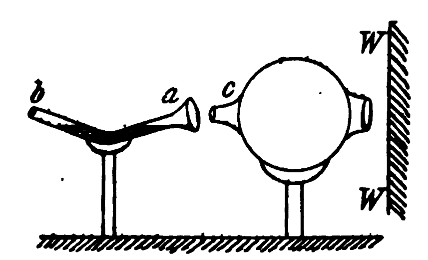


Fig. 462.



Antwort. Hängt man vor die offene Mündung eines Stimmgabelresonanzkästchens an zwei Fäden einen aus dünnem Kartenpapier verfertigten leichten Resonator, dessen Eigenton mit dem Tone der Stimmgabel übereinstimmt, so auf, wie es die nebenstehende Figur andeutet, so wird der Resonator beim Tönen der Gabel heftig abgestoßen. Noch überraschender gestaltet sich der Versuch, wenn man vor die offene Mündung einer Kundt'schen Röhre (siehe Seite 27) eine beiderseits offene Glasröhre, welche auf den Ton der Kundt'schen Röhre abgestimmt ist an zwei Fäden so aufhängt, dass die Achsen beider Röhren zusammenfallen; das Röhrchen wird beim Tönen heftig abgestoßen, trotzdem dasselbe den Schallwellen keinen Angriffspunkt darzubieten scheint. Dasselbe tritt auch bei einer einerseits geschlossenen Glasröhre auf.

2) Ein kleiner Glasresonator *R* (Fig. 461) wird in der Richtung seiner Achse *oo'* fortgestoßen. Um dieses zu zeigen, füllt man ein Gefäß noch ein wenig über den Rand mit Wasser und läßt den Resonator darauf schwimmen. Damit die Achse *oo'* horizontal steht, befestigt man mit Siegellack bei *a* ein Stück Draht. Das Gefäß stellt man knapp an eine Wand oder noch besser in eine Ecke. Läßt man das (schon oben erwähnte) Horn ertönen, so wird der Resonator immer in der Richtung *oo'* bewegt.

3) Man stellt vor die Oeffnung *c* eines Resonators (Fig. 462) horizontal ein Glasröhrchen, das unter einem sehr stumpfen Winkel gebogen und zum Teil mit Weingeist gefüllt ist. Um den Luftstrom besser aufzufangen, ist das Glasröhrchen bei *a* erweitert; die Ent-

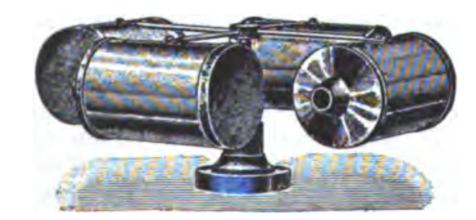
fernung $a\,c$ beträgt ½ cm. Beim Mittönen des Resonators bewegt sich die Flüssigkeit etwas weiter, und ihre Verschiebung wird an einer Millimeterteilung abgelesen und gibt ein Maß für die Schallintensität. Dieser gegen c gerichtete Ueberdruck ist offenbar als die Ursache der Bewegung des Resonators (bei Versuch 1 und 2) aufzufassen.

Fig. 463.



4). Eine kontinuierliche Rotation erhält man mittelst des von Dvorák konstruierten Schallreaktionsrades (Fig. 463). Dasselbe besteht aus 4 gleichen Resonanzkugeln, die an einem auf einer Spitze in horizontaler Ebene drehbaren leichtem Holzkreuze befestigt sind. Als Resonatoren verwendet man leichte gläserne Hohlkugeln von 3 bis 4 cm Durchmesser und 2 bis 4 mm Oeffnung. (Höhe des konischen Randes 4 bis 6 mm; Größe $a\,b$ des Holzkreuzes 8,5 cm). Die Mündungen der Resonatoren sind horizontal und in gleichem Sinne gerichtet. Sobald man den Oeffnungen der Resonatoren die Mündung des Klangkästchens einer tönenden Stimmgabel auf etwa 40 cm nahe bringt, gerät der Apparat in schnelle Rotation, derart, dass jeder Resonator dabei stets in der Richtung seiner Achse abgestoßen wird, so dass die Kraft gegen seine Mündung gerichtet scheint.

Fig. 464.



Derselbe Versuch läßt sich auch mit dem in Fig. 464 dargestellten Schallreaktionsrade ausführen, welches aus 4 durch ein leichtes Aluminiumkreuz verbundenen, genau auf den Ton c^2 abgestimmten Aluminium-Resonatoren besteht. Zum Betriebe dieses Apparates ist eine Stimmgabel c^2 mit Resonanzkasten erforderlich.

Frage 904. Auf welche Weise erklärte Dvorák die vorstehend beschriebenen akustischen Abstoßungserscheinungen?

Fig. 465.





Fig. 466.

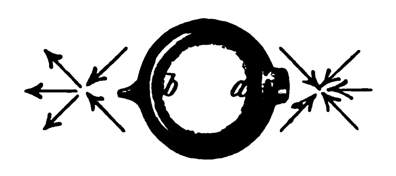
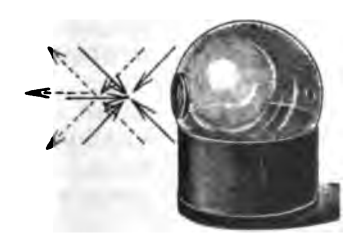


Fig. 467.



Antwort. Dvorák bewies mathematisch, dass, wenn die Amplitude einer schwingenden Luftsäule nicht gegen die Wellenlänge verschwindet, in dem Schwingungsknoten ein kleiner Ueberdruck gegen den äußeren Luftdruck herrscht, der auch durch Manometerversuche (siehe Versuch 3 in Antwort 903) nachweisbar ist, und erst im Schwingungsbauche nahezu gleich Null wird. Also ist dieser Ueberdruck in einem einseitig offenen Resonator, dessen offene Seite einer Schallquelle zugekehrt ist, ebenfalls vorhanden und verursacht Luftströmungen in demselben; infolge dieses Ueberdrucks wird der Resonator von der Schallquelle abgestoßen.

Um auch die Abstoßungserscheinungen einer beiderseits offenen Resonanzröhre begreiflich zu machen, müssen wir folgendes berücksichtigen: Blasen wir in eine zylindrische Röhre, so wird (siehe Fig. 465 I) die Luft in der Achsenrichtung fortgestoßen und zugleich in unmittelbarer Nähe der Austrittsöffnung angesaugt. Beim Saugen dagegen wird die Luft von allen Seiten angesaugt (siehe Fig. 465 II). Denkt man sich jetzt eine beiderseits offene Resonanzröhre (siehe Fig. 466), so werden durch die bei *a* ankommende Verdichtungswelle Luftströmungen erzeugt, welche den in Fig. 465 II dargestellten entsprechen, während bei *b* dieselben austreten. Die bei *a* diagonal gerichteten Ströme heben sich gegenseitig in ihren Wirkungen auf, so dass nur noch die nach *b* in der Achsenrichtung wirkende Kraft übrig bleibt, welche wegen der Ungleichheit der an beiden Mündungen *a* und *b* wirkenden Kräfte eine Bewegung des Resonators in der Achsenrichtung nach *b* hin zur

Folge haben muß (insbesondere auch deshalb, weil die Mündung *a* der Schallquelle näher ist als die Mündung *b*, und weil letztere zugleich enger ist). Figur 467 illustriert den Fall des nur einseitig offenen Resonators, wobei die gestrichelten Pfeile die bei der Verdünnung auftretenden Luftströme bezeichnen.

Frage 905. Zu welchen Resultaten gelangte Peter Lebedew (Wiedemanns Annalen der Physik, 1897) bei seinen Untersuchungen über die Bewegung von Luftresonatoren unter der Einwirkung von Tonquellen, deren Tonhöhe nicht vollkommen mit dem Eigentone des Resonators übereinstimmt?

Antwort. Die Lebedew'schen Untersuchungen (bei denen als Schallquelle ein Kundt'scher Stab und als Resonator eine dünnwandige Glasröhre benutzt wurde, deren Abstimmung durch Verschieben eines Korkstempels leicht verändert werden konnte, und wobei die ablenkenden Kräfte durch die Torsion oder Drehung eines Drahtes gemessen wurden, an dem der Resonator aufgehängt war) unterscheiden zunächst zwei Fälle:

1). Der Resonator befindet sich in unmittelbarer Nähe der Tonquelle, und

2). Der Resonator steht unter dem Einflusse von frei sich ausbreitenden ebenen Schallwellen.

Die Versuche haben zu folgendem Ergebnisse geführt:

1). Für die unmittelbare Nähe (1 cm Abstand) einer Schallquelle von geringer Ausdehnung:

Ist der Eigenton des Resonators h ö h e r als derjenige der Schallquelle, so wird er von letzterer a n g e z o g e n; ist der Eigenton des Resonators t i e f e r als derjenige der Schallquelle, so wird er a b g e s t o ß e n. Bei der stärksten Mitschwingung erfolgen auch die stärksten Wirkungen.

Vergrößert man den Abstand der Schallquelle vom Resonator, so verschwinden die anziehenden Kräfte nach und nach; in 10 cm

Erkl. 832. Es sind noch mehrfach Apparate für die Messung der Schallintensität angegeben, von denen hier nur der folgende erwähnt sein mag. M. Wien (1888) benutzt zu diesem Zwecke einen Helmholtz'schen Resonator, dessen eine Oeffnung erweitert und mit der oberen Hälfte der Kapsel eines Aneroidbarometers luftdicht verlötet ist (siehe Erkl. 833). Die Verdichtungen oder Verdünnungen, die ein Ton in der freien Luft erzeugt, werden innerhalb des Resonators bedeutend verstärkt, wenn dieser zuvor auf den betreffenden Ton abgestimmt worden ist. Es gerät deshalb die elastische Metallplatte, deren Eigenton wiederum mit dem des Resonators übereinstimmt, in Schwingungen, deren Amplitude sich mit Hilfe einer empfindlichen Spiegelübertragung messen läßt.

Abstand bleibt nur noch die abstoßende Kraft zurück.

2). Um die Kraftwirkung einer im Raume sich frei ausbreitenden Welle zu suchen, wurde eine viel intensivere Schallquelle angewendet und dabei festgestellt, dass es sich in diesem Falle um zwei verschiedene Kräfte handelt:

a) eine drehende Kraft, welche den Resonator unter einem bestimmten Winkel zur Wellenebene einzustellen sucht und

b) eine fortführende Kraft, welche den Resonator in der Richtung des Schalles fortzubewegen strebt.

Beide Kräfte konnten getrennt untersucht und gemessen werden; hierbei stellte sich heraus, dass

a) die Kräfte einer ebenen Welle den h ö h e r gestimmten Resonator so zu drehen suchen, dass seine Mitschwingung durch die Drehung v e r s t ä r k t wird, dass dagegen seine Mitschwingung durch die Drehung g e s c h w ä c h t wird, wenn der Resonator t i e f e r gestimmt ist wie die Schallquelle. Die stärkste Wirkung wurde beobachtet, wenn beide Töne nahezu gleichhoch waren.

b) dass die auffallende ebene Welle den Resonator in der Rich-

Erkl. 833. Das Aneroidbarometer (Fig. 468) besteht aus einer möglichst luftleeren, hermetisch geschlossenen Messingdose, deren dünner, wellenförmig gebogener Deckel sehr elastisch ist. Bei Zunahme des Luftdrucks wird derselbe etwas einwärts gedrückt und kehrt

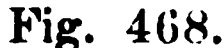
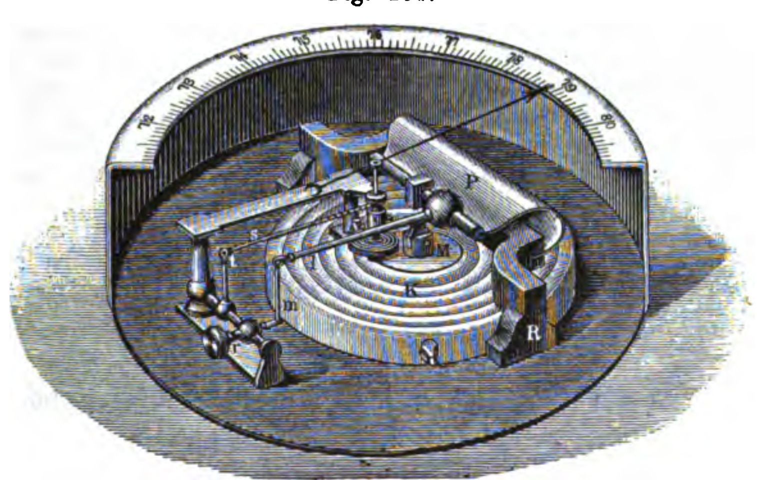


Fig. 468.



bei Abnahme desselben vermöge seiner Elastizität wieder in die ursprüngliche Lage zurück. Diese Bewegungen werden auf einen Zeiger übertragen, der sich auf einer Gradeinteilung dreht. Zu diesem Zwecke ist eine an der Bodenplatte des Apparats mittelst der Träger *R* befestigte starke breite Metallfeder *P* mit der Mitte des Deckels fest verbunden und wirkt also dem Luftdrucke entgegen. Steigt der Luftdruck so sinkt *P*, sowie dessen Verlängerung *l*, der Hebel *mr* wird nach rechts gedreht, hierdurch die Kette *s* nach rechts hin nachgelassen, was eine Drehung der Zeigerachse zur Folge hat. Eine Spiralfeder sorgt dafür, dass die

Kette *s* gespannt bleibt. Sinkt der Luftdruck, so rücken *P, M, l, m* in die Höhe, der Hebel *rm* wird nach links gedreht, die Kette *s* nach links gezogen, folglich auch der Zeiger nach links gedreht. (Siehe Lehrbuch der Aerostatik.)

tung des Schalles fortzuführen sucht, d. h. dass die Schallquelle den Resonator abstößt. Diese abstoßende Kraft erreicht ihren höchsten Wert, wenn die Mitschwingung gleichfalls am stärksten geworden ist.

Anmerkung XXX: Von Bergen Davis wurde (1900) die folgende Erscheinung beobachtet: Ein kleiner hohler, an einem Ende geschlossener, am andern offener Zylinder stellte sich in den stehenden Schallwellen quer zur Röhre ein, d. h. die Achse des Zylinders war senkrecht zu den Strömungslinien. Die Kraft, welche diese Bewegung hervorrief, war ziemlich beträchtlich.

Zur Erregung der stehenden Wellen diente eine geschlossene Orgelpfeife, welche ihren ersten Oberton gab. Ein Diaphragma aus dünnem Gummi war in einem Knoten quer zur Röhre befestigt, um die durch Blasen der Pfeife hervorgerufenen Luftströmungen zu beseitigen. Die benutzten Zylinder waren aus Gelatine, 3,1 cm lang und mit einem Querschnitt von 0,45 qcm. Eine kleine Mühle wurde aus vier solchen Zylindern hergestellt, indem man sie an Kartenpapier festklebte und mit einem Glaszapfen in der Mitte versah. Die Ebene der Mühle war senkrecht in den Stromlinien. Die Pfeife wurde vertikal befestigt und die Mühle auf eine Nadel gelegt; das ganze wurde an einem Stabe befestigt, mit dessen Hülfe man die Mühle hinbringen konnte, wohin man wollte. Sobald die Pfeife angeblasen wurde, rotierte die Mühle im Bauche mit grosser Geschwindigkeit, kam aber im Knoten zur Ruhe.

Erklärung: Die Luft im Zylinder bleibt in Ruhe, während die ausserhalb sich bewegt, wodurch eine Verschiedenheit in der Dichte an beiden Seiten des geschlossenen Endes des Zylinders hervorgerufen wird.

E. Von der Reflexion des Schalles und dem Echo.

Frage 906. Welche Erscheinung tritt ein, wenn die Schallwellen aus einem Mittel in ein anderes übergehen, und nach welchem Gesetze tritt diese Erscheinung auf?

Antwort. Wenn die Schallwellen aus einem Mittel in ein anderes übergehen, so erleiden sie immer eine teilweise (partielle) Reflexion; wenn sie aber auf ein festes Hindernis (Bergwände, Wälder, Wasser, Wolken) stoßen, so werden sie fast vollständig reflektiert.

Mag nun die Reflexion partiell oder vollständig sein, so ist doch der Reflexionswinkel stets dem Einfallswinkel gleich, analog der Reflexion elastischer Körper und der des Lichtes.

Hieraus ergeben sich folgende Gesetze:

Erkl. 834. Wir haben die Reflexionserscheinungen der Luft- und Wasserwellen im allgemeinen, und die dabei auftretenden Gesetze schon im ersten Bande der Akustik erörtert, und verweisen auf Seite 51 und Seite 76 des betreffenden Bandes; auch hat auf Seite 53 desselben schon das obige dritte Gesetz eine Illustration gefunden. Zum vollen Verständnis der nachfolgenden

Zeilen (besonders für diejenigen Leser, welche den ersten Band unserer Akustik nicht zur Hand haben) sei hier noch eine kurze Erörterung eingeschaltet:

Es ist in Figur 469 *mo* eine feste Wand, gegen welche sich in der Richtung *ao* eine Schallwelle bewegt; es wird ein Teil der Bewegung auf die Wand übergehen, der größte Teil aber wird sich in der Richtung *ob* fortpflanzen, welche mit dem Einfallslote *co* einen eben so großen Winkel einschließt, wie *ao* ,d. h. der Reflexionswinkel β ist dem Einfallswinkel α gleich. Ein Beobachter also, welcher sich in irgend einem Punkte der Linie *ob* befindet, wird einen in dem Punkte *a* erregten Ton einmal direkt und zum zweiten Male so hören, als ob er von *o* oder einem Punkte der Verlängerung der Linie *ob* ausginge. Die örtlichen Verhältnisse können aber auch derart sein, (Fig. 470) dass ein direkter Schall das Ohr überhaupt nicht trifft, wenn sich in der Richtung nach der Schallquelle hin Hindernisse für die freie Ausbreitung des Schalles befinden, und dass ein Berg oder eine Häuserreihe in dieser Richtung liegt. Die erste feste Wand *WW* hält dann die ursprünglichen Schallwellen von unserm Ohre ab, während die zweite Wandd *MM*, welche von den ursprünglichen Wellen getroffen wird,diese zu unserem Ohre reflektiert. Der in *c* stehende Beobachter erhält dann denselben Eindruck, wie wenn der Schall nach der Reflexion von einem Punkte herkäme, der ebensoweit hinter der Wand liegt als der schallerregende Punkt vor derselben. Damit der Schall nach irgend einem Beobachtungsorte *c* reflektiert wird, muß die durch den Beobachtungsort und durch den Gegenpunkt *l* des schallerregenden Punktes *L* gezogene Gerade *lc* die ebene Wand treffen.

1). Ist die Richtung der Schallstrahlen auf der reflektierenden Fläche senkrecht, so werden sie auch in derselben Richtung zurückgeworfen.

2). Fallen die Schallstrahlen unter einem schiefen Winkel auf die reflektierende Fläche, so werden sie unter dem gleichen Winkel nach der andern Seite zurückgeworfen.

3). Wenn Schallstrahlen von dem Brennpunkte eines elliptisch begrenzten Raumes ausgehen, so werden sie nach der Reflexion an den Wänden im andern Brennpunkte vereinigt.

Fig. 469.

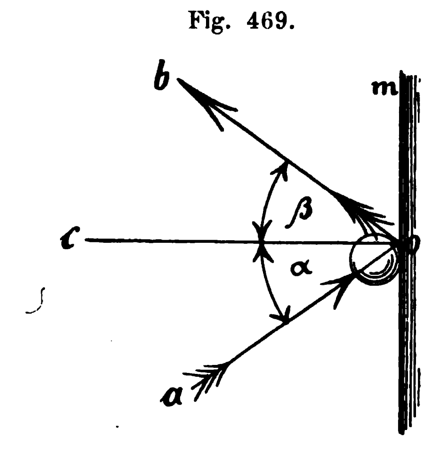
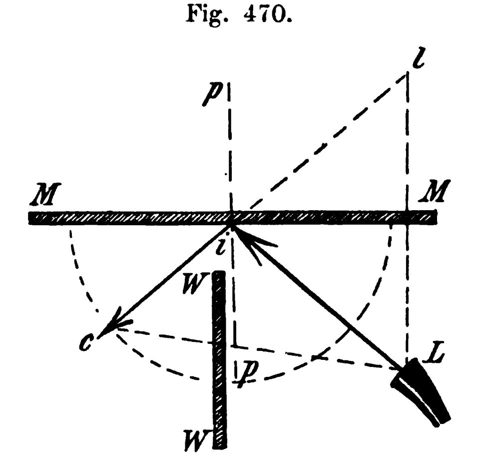


Fig. 470.



Frage 907. Zu der hier besprochenen Erscheinung der Schallreflexion findet sich eine Analogie in der Reflexion des Lichts und der strahlenden Wärme. Beide sind, wie der Schall, Wellenbewegungen, verteilen sich wie der Schall im Raume und nehmen nach demselben Gesetze an Stärke ab. Durch welche Experimente können wir zeigen, dass sich zu jeder Erscheinung der Lichtspiegelung eine ähnliche bei der Zurückwerfung des Schalles findet?

Erkl. 835. Die bei den nebenstehend beschriebenen Experimenten zur Anwendung kommenden beiden Hohlspiegelgesetze lauten:

1) Befindet sich ein Gegenstand jenseits des geometrischen Mittelpunkts des Hohlspiegels, so entsteht zwischen dem Brennpunkte und dem geometrischen Mittelpunkte ein reelles, umgekehrtes, verkleinertes Bild.

2) Befindet sich der Gegenstand zwischen dem geometrischen Mittelpunkte und dem Brennpunkte, so entsteht jenseits des Mittelpunktes ein objektives vergrößertes, umgekehrtes Bild. Das eine dieser Gesetze kann als die Umkehrung des andern angesehen werden.

Antwort. 1). Wir legen einen großen metallenen Hohlspiegel auf den Tisch (Fig. 471). Ein solcher Spiegel entwirft von leuchtenden Gegenständen, welche passend aufgestellt sind, sogenannte objektive Bilder, die man

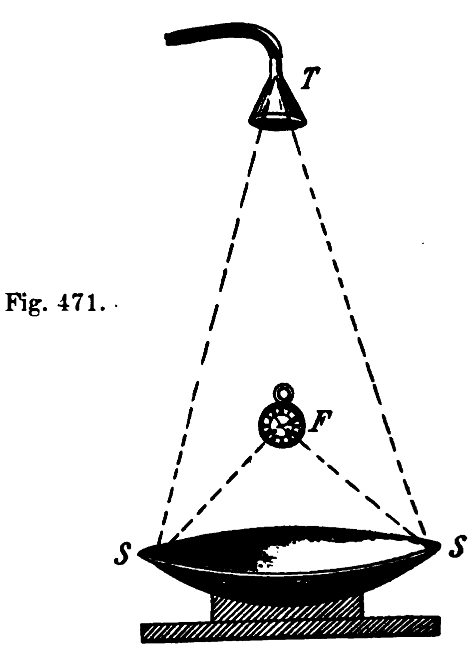


Fig. 471.

auf einem Schirme auffangen kann. (Siehe Lehrbuch der Optik). Hat man über dem Spiegel *SS* eine Glühlampe aufgehängt, so kann man mit einem Streifchen Papier in der Hand leicht den Ort des Bildes aufsuchen. Wenn dieser gefunden ist, bringen wir eine Taschenuhr an den Ort des Bildes und einen Trichter an den Ort der Glühlampe, derart, dass das eine Ende des Glastrichters mit dem Gehörgange in Verbindung steht, und die Trichteröffnung dem Spiegel zugewandt ist. Wir hören dann sehr deutlich das Ticken der Uhr, auch wenn das Ohr sich in beträchtlicher Entfernung von derselben befindet, was man durch passende Aufstellung der Apparate leicht erreichen kann, während

Erkl. 836. In den nebenstehenden Zeichnungen sind die Spiegel horizontal angeordnet; der Erfolg ist selbstverständlich derselbe, wenn man die Spiegel vertikal aufstellt, was mit Hilfe geeigneter Ständer leicht geschehen kann. Eine Anschauung dieser Anordnung erhält man, wenn man die vorstehenden Zeichnungen um einen Viertelkreis dreht.

Fig. 472.



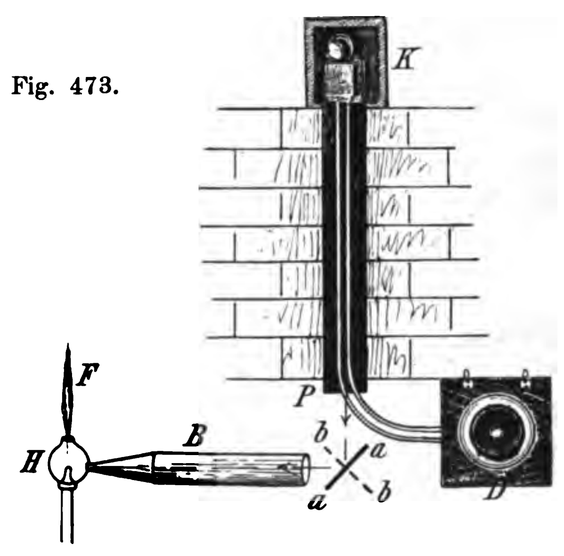
man fast nichts hört, wenn man den Spiegel fortnimmt. Stellen wir die Lampe in *T* auf, so finden wir ihr Bild in *F*; stellen wir aber die Lampe in *F* auf, so zeigt sich ihr Bild in *T*; ebenso können wir die Stelle der Uhr und des Trichters miteinander vertauschen, indem dann die von der in *T* befindlichen Uhr ausgehenden Schallstrahlen durch die Reflexion des Spiegels in *F* konzentriert werden.

2). Gleichwie man zwei solcher „conjugierten Spiegel'' benutzt, um die Reflexion von Licht und strahlender Wärme zu zeigen, kann man mit Hilfe derselben auch die Schallreflexion zeigen, und zugleich damit beweisen, d a s s d e r R e f l e x i o n s - w i n k e l d e m E i n f a l l s w i n - k e l g l e i c h i s t. Der eine dieser beiden Spiegel liegt auf dem Tische (Fig. 472), während der andere bis zur Decke des Zimmers gezogen wird. Wird das elektrische Licht in den Brennpunkt *F* des unteren Spiegels gestellt, so steigt ein Bündel paralleler Strahlen, „wie eine leuchtende Säule'' zum oberen Spiegel auf, der die Strahlen in seinem Brennpunkte *T* vereinigt, in welchem eine Taschenuhr aufgehängt ist, deren Ticken wir in der Nähe des unteren Spiegels nicht zu hören vermögen. Die von der Uhr ausgehenden Schallstrahlen werden aber in der Richtung der gezeichneten Linien in den untern Fokus *F* zusammengeworfen, und wenn wir an dieser Stelle einen Trichter mit einer Röhre anbringen, die bis zum Ohre reicht, so ist das Ticken so hörbar, als wenn wir die Uhr an das Ohr halten; es scheint als ob der Schall nicht aus der Uhr selbst, sondern aus dem unteren Spiegel käme. Auch hier können Uhr und Trichter miteinander vertauscht werden.

Frage 908. Durch welchen Versuch kann man mit Hilfe einer sensitiven Gasflamme und einer elektrischen Klingel nachweisen, dass der Schall sowohl an festen Körpern, sowie an der Grenze verschieden dichter Luftmassen reflektiert wird?

Antwort. Wir benutzen als Schallquelle eine gewöhnliche elektrische Klingel *K* (Fig. 473), welche durch ein Tauchelement in Gang gesetzt werden kann. Der Schall derselben wird durch eine etwa 8 cm weite und 80 bis 100 cm

Fig. 473.



lange Pappröhre *P* nach dem Beobachtungsorte geleitet. Die Klingel befindet sich in einem mit Filz ausgeschlagenem Kasten, am besten außerhalb des Beobachtungszimmers, indem man die Röhre durch eine in der Wand angebrachte Oeffnung steckt. Die beiden Leitungsdrähte von umsponnenem Kupfer führen an der Innenwand des Papprohres nach dem Drücker D, durch dessen Berührung der Strom geschlossen wird. (Die Elektrizitätsquelle ist in der Zeichnung weggelassen). Zugleich wird im Beobachtungszimmer ein Blechrohr *B* von etwa 4 cm Durchmesser und 30 cm Länge so aufgestellt, dass die Achsen der beiden Rohre sich unter einem rechten Winkel kreuzen. Das Blechrohr mit seiner kegelförmigen Spitze mündet in eine oben offene messingene Hohlkugel *H*, in welche von unten ein Bren-

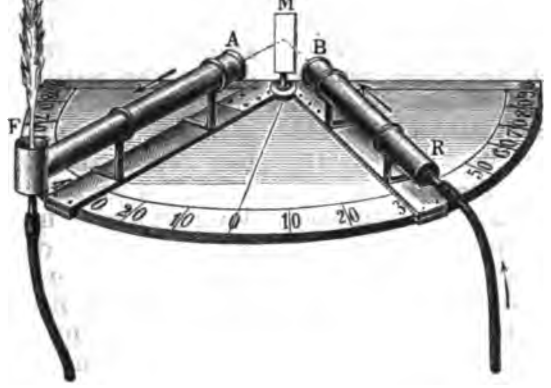
Fig. 474.



Erkl. 837. Um die Gesetze der Schallreflexion zu erläutern, hat Cottrell den in der nebenstehenden Figur 475 dargestellten Apparat konstruiert. Derselbe besteht aus zwei Röhren *AF* und *BR* nebst einer Schallquelle am Ende *R* der einen und einer empfindlichen Flamme *F* am Ende der andern. Die Achsen der Röhren sind auf den Spiegel *M* gerichtet und können so verstellt werden, dass sie jeden beliebigen Winkel einschließen. Die Einfalls- und Reflexionswinkel werden von dem graduierten Halbkreise abgelesen. Der Spiegel *M* ist gleichfalls um eine vertikale Achse beweglich. (Tyndall, Der Schall.)

ner für eine sensitive Flamme *F* so eingesetzt ist, dass seine Mündung dicht unter dem Kugelmittelpunkte sich befindet. Nach Entzündung der Flamme reguliert man den Gaszufluß derart, dass die Flamme mäßig empfindlich ist, d. h., dass sie durch das Tönen der Klingel nur schwach beeinflußt wird. Hält man dann ein Buch oder ein Brettchen in der Richtung der Linie *a a* vor die beiden Röhren, so werden die aus dem Papprohre austretenden Schallstrahlen nach dem Blechrohre reflektiert, und die Flamme stark beeinflußt, hält man dagegen den reflektierenden Körper in der Richtung *b b* zwischen die beiden Röhren, so wird die Flamme fast gar nicht beeinflußt. Benutzt man anstelle des festen Körpers eine flache Gasflamme (Fig. 474) als reflektierende Wand, und bringt dieselbe das eine Mal in die Richtung *a a* und ein anderes Mal in die Richtung *b b*, so ist der Unterschied der Wirkungen bei beiden Stellungen gut zu beobachten. (Nach Weinhold.)

Fig. 475.



Frage 909. Welches sind die auf der Reflexion des Schalles beruhenden Erscheinungen?

Antwort. Die auf der Reflexion des Schalles beruhenden Erscheinungen sind:

1) Die Verstärkung des Schalles,
2) der Nachhall und
3) das Echo.

Frage 910. Wann entsteht durch Reflexion eine Verstärkung des Schalles?

Erkl. 838. Bei der in geschlossenen Räumen eintretenden Schallverstärkung wird der Schall auch etwas verändert, indem seine Reflexion von den Wänden infolge der verhältnismäßig geringen Geschwindigkeit der Schallwellen immer eine gewisse Zeit braucht, wodurch der Schall mehr oder weniger verlängert wird. Auch ist die Beschaffenheit der reflektierenden Wand auf die Intensität des reflektierten Schalles von großem Einflusse. Dichte, in Falten niederhängende Gardinen dämpfen ihn großenteils; eine glatte Steinwand oder eine ebene Holzwand oder ein großer Wandspiegel werfen ihn mit fast unverminderter Stärke zurück. Wenn wir ein Buch vor das Gesicht haltend laut lesen oder gegen eine Wand gekehrt reden, so empfinden wir deutlich die wieder entgegenkommenden Schallwellen.

Antwort. Wenn in einem geschlossenen Zimmer ein Schall hervorgebracht wird, so pflanzen sich die Schallwellen nach allen Richtungen hin fort, stoßen gegen die Wände des Zimmers und werden von diesen zurückgeworfen (was sich mehrmals wiederholen kann). Eine im Zimmer anwesende Person wird nicht nur den ursprünglichen Schall vernehmen, sondern gleichzeitig mit demselben den zurückgeworfenen Schall hören, wodurch eine bedeutende Verstärkung des Schalles eintritt. Aus diesem Grunde ist es viel leichter, das gesprochene Wort in einem geschlossenen Raume klar und deutlich zu hören, als im Freien. In jedem geschlossenen Raume wird ein kontinuierlicher Schall durch die von den Wänden reflektierten Wellen verstärkt.

Frage 911. Was verstehen wir unter einem Nachhall und wann tritt diese durch Reflexion des Schalles hervorgerufene Erscheinung ein?

Erkl. 839. Der Nachhall ist in allen großen geschlossenen und leeren Räumlichkeiten wahrzunehmen, wo die Reflexion des Schalles freien Spielraum hat. Um denselben zu beseitigen, müssen große glatte und ebene Wand-

Antwort. Darunter verstehen wir diejenige Erscheinung, dass der reflektierte Schall infolge der größeren Entfernung der Wände von der Schallquelle, nicht mehr vollständig mit dem ursprünglichen Schalle zusammenfällt, sondern diesen nur teilweise verstärkt und teilweise verlängert. Diese Erscheinung tritt ein, wenn ein

flächen, sowie regelmäßige Formen, wie Kugel- und Zylinderformen der Gebäude möglichst vermieden werden. Die Logen in einem Theater, die reichen Verzierungen an den Wänden, die Galerien und Vorhänge dienen nicht blos zur Annehmlichkeit der Zuschauer und zur Verschönerung der Räume, sondern sie haben den weit wichtigeren Zweck den störenden Nachhall zu verhindern, was um so mehr geschieht, eine je reichere Gliederung die Wände zeigen, durch welche eine regelmäßige Reflexion der Schallwellen alsdann verhindert wird. (Siehe das letzte Kapitel dieses Bandes.)

Erkl. 840. „Die Reflexion des Schalles bringt in großen unmöblierten Sälen oft wunderbare Wirkungen hervor. Stehen wir z. B. auf der Galerie der Börse in Paris, so hören wir das verworrene Geschrei der unten versammelten aufgeregten Menge. Wir sehen alle Bewegungen, sowohl der Lippen als die der Hände und Arme. Wir wissen, dass man spricht, und oft mit großer Lebhaftigkeit, aber was man sagt, das hören wir nicht. Die Stimmen mischen sich mit ihren Echos zu einem Chaos von Lärm, aus dem keine verständliche Aeußerung hervor kommen kann. Die Echos eines Zimmers werden durch die Möbel sehr gedämpft. Man kann, wenn Zuhörer anwesend sind, oft eine Rede deutlich verstehen, während in dem leeren Hörsaale die Verständlichkeit der direkten Stimme durch den Nachhall aufgehoben wird.“ (Tyndall.)

geschlossener Raum größere Dimensionen annimmt, wie z. B. in einem Konzert- oder Theatersaale oder in Kirchenräumen. In solchen Räumen gelangt dann häufig der zweite Laut des gesprochenen Wortes zu derselben Zeit in das Ohr des Hörers, wie der erste nach der Reflexion von einer hinter demselben befindlichen Wand, und so hört er den zweiten Laut nicht rein, sondern mit dem ersten gemischt, und ebenso wird der dritte Laut durch den Widerhall des zweiten getrübt und so fort. Der Nachhall macht deshalb das ganze Wort undeutlich, besonders wenn mehrere reflektierende Wände, Nischen, Säulen u. dergl. in Betracht kommen.

Jedermann weiß, wie unangenehm namentlich oft in älteren gothischen Kirchen die Vermischung der Laute, welche der Nachhall hervorbringt, sowohl dem Kanzelredner als dem Zuhörer werden kann. Ersterer wird gezwungen, in unbewegter Haltung mit großer Kraftanstrengung und mit möglichster Bedächtigkeit zu reden, und der Zuhörer muß peinlich aufmerksam sein, um zu verstehen, was geredet wird.

Frage 912. Welche Art der Schallreflexion nennt man Echo oder Widerhall, und welches ist eine notwendige Bedingung für die Entstehung des Echos?

Erkl. 841. Der Ort, von welchem der Schall ausgeht, heißt das phonische Zentrum, während man den

Antwort. Unter Echo oder Widerhall verstehen wir einen reflektierten Schall, der sich (im Gegensatze zu dem Nachhall) von dem ursprünglichen Schalle deutlich unterscheiden läßt, derart, dass die reflektierten Wellen auf unser Gehörorgan denselben Ein-

Ort, wohin die Schallstrahlen zurückgeworfen werden, phonokamptisches Zentrum nennt. Bei den meisten Echos fallen diese Orte zusammen. Wenn nun die Schallwellen rechtwinklig auf die reflektierende Fläche treffen, so müssen sie zu ihrem Ausgangspunkte zurückkehren. Das phonokamptische Zentrum kann also nur bei solchen Echos vorkommen, wo der Ort, von dem die Schallwellen ausgehen, nicht zusammenfällt, mit dem Ort, wohin sie reflektiert werden, und in dem man sich befinden muß, um das Echo wahrzunehmen. Hierbei lassen sich wieder zwei Fälle unterscheiden, je nachdem an diesem Orte nur das Echo oder auch noch der ursprüngliche Schall zu hören ist.

druck machen, wie die direkten Wellen.

Eine notwendige Bedingung für die Entstehung des Echos ist, dass zwischen der Wahrnehmung des ursprünglichen und reflektierten Schalles eine gewisse Zeit verstreicht, damit beide einzeln vom Ohre aufgenommen werden können. Die hierzu notwendige Entfernung der reflektierenden Wände hängt von der Zahl der Laute ab, welche unser Ohr in einer gegebenen Zeit zu unterscheiden vermag.

Frage 913. Wie weit müssen die reflektierenden Wände von der Schallquelle notwendig entfernt sein, wenn ein deutliches Echo entstehen soll?

Erkl. 842. Die Ansichten, wie viele Silben durch ein vollkommenes Sprachorgan in einer Sekunde deutlich gesprochen werden können, gehen ziemlich weit auseinander, weil die Länge der Silben, die Art und der Wechsel der Konsonanten in ihnen und die individuelle Uebung, welche man im Aussprechen derselben sich erworben hat, jede genaue Bestimmung unmöglich macht. Lichtenberg gibt an, das Aussprechen der ersten zehn Zahlen oft mit Hilfe einer genauen Pendeluhr versucht und gefunden zu haben, dass er hierzu im Mittel einer Sekunde Zeit bedurfte. Diese zehn Silben haben eine sehr leichte Folge, und ein jeder hat sich an das Aussprechen derselben sehr gewöhnt, allein, es hält dennoch schwer, sie alle in dem angegebenen Zeitraume hervorzubringen, ja es dürfte kaum gelingen, die acht Töne einer Tonleiter innerhalb einer Sekunde klar und deutlich zu singen. Trotzdem hat man in

Antwort. Um diese Frage richtig beantworten zu können, müssen wir erst feststellen, wie viele wohlartikulierte Silben wir in einer Sekunde auszusprechen vermögen. Mit der Uhr in der Hand können wir uns leicht davon überzeugen, dass wir zur klaren Aussprache eines viersilbigen Wortes (wie z. B. des Wortes: „Amerika" oder „Mississippi" oder Mimodrama" oder „Oberbergrat" und dergl.) eine Sekunde Zeit gebrauchen. Unter dieser Voraussetzung läßt sich jetzt leicht berechnen, wie weit die reflektierende Wand von uns entfernt sein muss, wenn wir in einer ¼ Sekunde eine Silbe aussprechen und dieselbe in der zweiten ¼ Sekunde durch das Echo wiederholt hören wollen, denn da der Schall bei 15° C in der Sekunde 340 m, also in der ¼ Sekunde 340/4 oder 85 m zurücklegt, so muß die Wand, durch welche das Echo entsteht, mindestens ½ mal 85 m, also 42½ m vom Beobachter entfernt sein, da dann der Schall einer Silbe den Weg zur Wand und wieder zurück in ¼

den meisten Lehrbüchern der Physik die Lichtenberg'sche Beobachtung zu Grunde gelegt, wonach das Ohr in einer Sekunde höchstens 10 Silben deutlich getrennt unterscheiden kann. Sollen wir also (unter dieser Voraussetzung) einen Schall von einem vorhergehenden deutlich unterscheiden, so darf der zweite erst $^1/_{10}$ Sekunde nach dem Beginn des ersten anfangen. Damit also ein Echo entstehe, muß der reflektierte Schall mindestens $^1/_{10}$ Sekunde später das Ohr treffen als der ursprüngliche. Er muß demnach für den Hin- und Rückweg wenigstens $^1/_{10}$ Sekunde gebrauchen, also einen Weg von mindestens 340 : 10 oder 34 m zurücklegen. Dies ist aber der Fall, wenn die reflektierende Wand wenigstens 17 m entfernt ist. In der Entfernung von 34 m können wir daher auf die erste Silbe eine zweite folgen lassen, welche $^1/_{10}$ Sekunde dauert und erst $^1/_{10}$ Sekunde nach der zweiten Silbe wird die erste zurückgeworfen, also noch deutlich unterscheidbar, zu uns gelangen. In der Entfernung von 34 m von der festen Wand wird also (nach der aufgestellten Voraussetzung) ein sogenanntes zweisilbiges, in noch größerer Entfernung ein drei- oder mehrsilbiges Echo auftreten. (Siehe Antw. **914.**)

Sekunde durchläuft. Ist aber die reflektierende Wand weiter entfernt als 42½ m, so wird zwischen der Wahrnehmung des direkten und des reflektierten Schalles eine längere Zeit vergehen; ist z. B. die Wand 85 m entfernt, so muß der Schall einen Weg von 2 . 85, also 170 m durchlaufen, ehe er wieder an dem Orte seiner Entstehung ankommt (wobei noch vorausgesetzt ist, dass die Schallstrahlen die Wand unter rechtem Winkel treffen; dazu ist eine Zeit von ½ Sekunde notwendig. Rufen wir also in der ersten ¼ Sekunde gegen die Wand das einsilbige Wort „Hans", so kommt der Schall in der zweiten ¼ Sekunde an der Wand und in der dritten ¼ Sekunde wieder an der Schallquelle an, so dass zwischen dem gesprochenen und dem reflektierten Worte eine ¼ Sekunde Zeit liegt, in welcher kein Echo zu hören ist. Ist die Wand 127,5 m entfernt, so hat der Schall 255 m Weg zurückzulegen, wozu ¾ Sekunden Zeit notwendig sind, so dass in diesem Falle nach Ausrufen der Silbe „Hans" ½ Sekunde lang Ruhe herrschen und erst in der dritten ¼ Sekunde das Echo zu hören sein wird, und bei einer 170 m weit entfernten Wand ist das reflektierte Wort „Hans" erst eine Sekunde nach dem direkten Schalle zu hören, so dass zwischen beiden Schallen eine Pause von ¾ Sekunden liegt.

Frage 914. Welche verschiedenen Arten der Echos unterscheidet man

a) nach der Anzahl der wiederholten Silben,

b) nach der Anzahl der Wiederholungen einer und derselben Silbe oder auch mehrerer Silben?

Antwort. a) Je nach der Anzahl der wiederholten Silben unterscheidet man ein- und mehrsilbige Echos, welche durch die Entfernung der reflektierenden Wand bestimmt werden.

b) Je nach der Anzahl der Wiederholungen einer und derselben

Erkl. 843. Der weitaus größte Teil dessen, was wir hören, rührt von reflektierten und nur der kleinere Teil von direkten Schallwellen her. Das donnernde Getöse von Wasserfällen, welche durch hohe Felswände eingeengt sind, wie derjenige in der Lichtensteinklamm oder der Reußfall in der Schweiz; das Getöse eines durch einen Viadukt oder Tunnel fahrenden Eisenbahnzuges, die lauten Schläge der Schaufelräder, wenn ein Dampfschiff unter einer Brücke wegfährt, gleichwie der um die Kuppel der Peterskirche in Rom wandernde Schall sind Produkte der Reflexion.

Silbe oder auch mehrerer Silben, welche von der Anzahl der reflektierenden Ebenen abhängt, unterscheidet man ein- und mehrmalige (ein- und mehrfache) Echos.

Frage 915. Unter welchen Umständen entsteht ein einsilbiges Echo?

Antwort. Unter der in Antwort 913 gemachten Voraussetzung, dass man in jeder Sekunde höchsten 4 Silben deutlich voneinander unterscheiden kann, entsteht ein einsilbiges Echo, wenn die reflektierende Wand nur einmal 42½ m von dem im schallerregenden Punkte selbst befindlichen Beobachter entfernt ist; das Echo wiederholt dann entweder nur einsilbige Wörter oder von mehrsilbigen Wörtern nur die letzte Silbe. Spricht man bei der angegebenen Entfernung der reflektierenden Wand zwei Silben hintereinander aus, so fällt das Echo der ersten Silbe mit der ausgesprochenen zweiten zusammen; also kann nur das Echo der zweiten Silbe gehört werden. Rufen wir 42½ m von einer Wand entfernt stehend das Wort „Obergrat" in einer Sekunde aus, so wird in der nächsten ¼ Sekunde das Wort „Rat" an unser Ohr treffen, während die ersten 3 reflektierten Silben mit den letzten 3 direkten Silben zusammenfallen und deshalb nicht zu hören sind.

Erkl. 844. Befindet sich der Beobachter selbst im schallerregenden Punkte, so ist der Wegunterschied s des reflektierten und des unmittelbaren Schalles gleich dem doppelten Abstande $2d$ des Beobachters von der Wand, folglich ist dieser Abstand d gleich $\frac{1}{2}s$. Sprechen wir in einer Sekunde die drei Silben „Li Hung Tschang" aus (also in jeder ⅓ Sekunde eine Silbe), so hört der Beobachter ein einsilbiges Echo, wenn die Zwischenzeit des reflektierten und des unmittelbaren Schalles ⅓ Sekunde beträgt; nehmen wir nun an, dass der Schall in einer Sekunde 340 m zurücklegt, so ist der Wegunterschied des reflektierten und des direkten Schalles $s = \frac{1}{3} \cdot 340$ oder $113\frac{1}{3}$ m, folglich entsteht ein einsilbiges Echo, wenn die reflektierende Wand vom Beobachter $\frac{1}{2}s$ oder $56\frac{2}{3}$ m entfernt ist, und wir hören alsdann, nach Aussprache der obigen 3 Silben im ersten Drittel der folgenden Sekunde die reflektierte Silbe „Tschang".

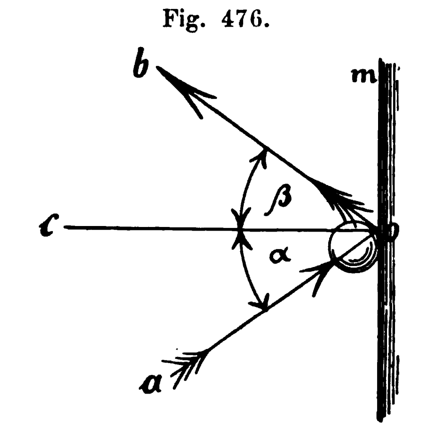
Nehmen wir an, dass wir in einer Sekunde 10 Töne voneinander unterscheiden können, so hören wir ein ein-

töniges Echo nach $^{1}/_{10}$ Sekunde, in welcher der Schall 34 m zurücklegt, so dass in diesem Falle die reflektierende Wand ½ . 34 oder 17 m vom Beobachter entfernt sein muss.

Frage 916. Wann entsteht ein zwei- oder mehrsilbiges Echo?

Antwort. Ein zweisilbiges Echo entsteht (unter der Voraussetzung, dass in einer Sekunde 4 Silben gesprochen werden), wenn die Entfernung der reflektierenden Wand wenigstens 2 . 42½ m oder 85 m beträgt. Eine solche Wand gibt ein zweisilbiges Wort vollständig wieder, von einem dreisilbigen aber nur die beiden letzten Silben, weil das Echo der ersten Silbe mit der ausgesprochenen dritten Silbe zusammenfällt. Rufen wir einer solchen Wand gegenüber die Frage: „Was gereicht uns zum Heile?", so gibt das Echo die Antwort: „Eile!"

Fig. 476.



Das vorstehend Gesagte lässt sich unmittelbar auf das mehrsilbige Echo anwenden; die Entfernung der Wand braucht nur mit der Silbenzahl multipliziert zu werden. Sprechen wir z. B. in einer Sekunde das Wort „Amerika", und soll das Echo das Wort „Erika" rufen, so muß die reflektierende Wand 3mal 42,5 m oder

Erkl. 845. Sprechen wir in einer Sekunde 5 Silben aus, so erzeugt eine Wand in 34 m Distanz ein einsilbiges, in 68 m Entfernung ein zweisilbiges, in 102 m aber ein dreisilbiges Echo. Diese Entfernungen verringern sich noch mehr, wenn man mehr als 5 Silben in der Sekunde ausspricht. Die Distanz muß immer so groß genommen werden, dass der Schall die Zeit hat, zwischen dem Beobachter und der Wand hin- und herzugehen, während man das Wort oder den Satz ausspricht, welchen das Echo wiederholen soll. Hierbei kann angenommen werden, dass die Dauer der Silben kürzer ist, wenn man mehrere hintereinander, als wenn man einzelne hervorbringt, so dass z. B. ein 7-silbiges Echo schon bei 6mal 34 m oder 204 m Distanz entstehen kann.

Erkl. 846. Es wurde bisher vorausgesetzt, dass der Beobachter das Echo eines Schalles hört, den er selbst hervorbringt und der zur Quelle zurückkehrt. Ganz ähnlich verhält es sich, wenn der Schall in der Ferne entsteht, z. B. im Punkte *a* der Fig. 476, während der Beobachter sich in *b* befindet. Die Entfernung, auf welche es ankommt, ist hier die Differenz zwischen dem geraden Wege *ab* und dem Umwege *acb*; sie stellt wieder den Vorsprung des direkten Schalles gegen den reflektierten vor, und muß für eine Silbe (bei 4 Silben pro Sek.) wenigstens 42½ m, für zwei 85 m usw. betragen.

127,5 m entfernt sein, denn alsdann muß der Schall 255 m Weg zurücklegen, wozu ¾ Sekunden Zeit nötig sind. Zur Entstehung eines viersilbigen Echos ist eine 4mal 42,5 m entfernte Wand nötig, usw.

Frage 917. Was verstehen wir unter einem einfachen und unter einem vielfachen Echo und unter welchen Umständen entstehen dieselben?

Erkl. 847. Die vielfachen Echos können einsilbig sein; wegen der langen Zeit des Ausbleibens der letzten Wiederholungen können sie aber nicht so vielsilbig sein, als die einfachen. Da der Schall um so schwächer wird, je größer der zu durchlaufende Weg ist, so folgt hieraus, dass die letzten Wiederholungen des vielfachen Echos schwächer werden. Im allgemeinen sind die Wiederholungen an Zahl ungleich, indem man deren von 2 bis 30 und 60 und noch mehr gefunden haben will, wovon einige dadurch erklärlich sind, dass die Schallstrahlen von zwei parallelen Flächen dem zwischen ihnen befindlichen Ohre auf gleiche Weise vervielfältigt zugeworfen werden, gleichwie eine unendliche Menge Bilder von einer Kerze zu sehen sind, die wir zwischen zwei parallele Spiegel bringen.

Antwort. Einfach (oder einmalig) heißt ein Echo, wenn nur eine reflektierende Wand vorhanden ist. Vielfach (mehrfach oder mehrstimmig) dagegen heißt ein Echo, welches denselben Ton oder dieselben Worte mehreremale hintereinander wiederholt. Ein solches Echo erhält man, wenn mehrere reflektierende Wände in verschiedenen Entfernungen vorhanden sind, oder wenn ein Schall zwischen zwei einander parallel gegenüberstehenden Wänden erregt wird. Der Schall kehrt entweder von jeder einzelnen Wand zum Beobachter zurück, oder er läuft erst von der einen zur andern.

Frage 918. Die häufig beobachteten Wirkungen des Widerhallens von entfernten Wänden, Mauern, Häusern, Ufern u. dergl. m. zeigen deutlich, dass Flächen der verschiedensten Beschaffenheit die Schallwellen zurückwerfen, allein die genauere Beobachtung hat zugleich welchen Unterschied in der Art des Widerhallens festgestellt?

Antwort. Zuweilen hört man die einzelnen Laute des Echos nur dumpf und rauh, wie eine aus der Tiefe kommende Stimme, oft aber sind sie scharf und angenehm klingend, hell und glockenähnlich tönend. Ueberhaupt darf man im allgemeinen annehmen, dass gute und vorzüglich helle Echos die

Erkl. 848. Lichtenberg findet die Ursache dieser Verstärkung teils in den kleinen ausgehöhlten Räumen verwitterter Mauern mit ihren vielen, im zerfallenen Mörtel hervorragenden Steinchen, wodurch eine sehr große Menge solcher Ebenen gebildet wird, welche die auffallenden Schallstrahlen zum Ohre des Hörenden reflektieren. Auf gleiche Weise sollen auch viele Ebenen, welche namentlich Tannenbäume mit ihrer rauhen Rinde bilden, zur Erzeugung eines stark schallenden Echos vorzüglich geeignet sein . Ferner ist Lichtenberg der Ansicht, dass schräg auffallende nicht reflektierte Strahlen doch eine Bebung der Mauer erzeugen. und hierdurch die Reflexion verstärken.

Laute stärker wiederholen, als sie auf die doppelte Entfernung gehört werden würden, ja sogar zuweilen die Worte vernehmlicher wiedergeben, oder doch wiederzugeben scheinen, als sie ursprünglich gesprochen sind. (S. nebenstehende Erkl.)

Frage 919. Welches sind im allgemeinen die Ursachen dieser Schallverstärkung durch Schallreflektoren?

Erkl. 849. Die Erfahrung zeigt, dass zur Reflexion der Schallwellen ganz ebene Flächen nicht erforderlich sind, wie z. B. zur Erzeugung der Bilder durch Spiegel. Die verschiedensten Körper, als Mauern, Wälle, Festungswerke, Häuser, Berge, Bergschluchten, Felsen, verfallene Türme, Höhlen, hohe Ufer, Wälder u. dergl. sind geeignete Schallreflektoren; auch wird der Schall von Wolken reflektiert und hierdurch, verbunden mit den widerhallenden Gegenständen auf der Erdoberfläche, erklärt sich das Rollen und tiefere Tönen des Donners. Schallreflektoren sind auch die Segel der Schiffe auf dem Meere, sowie hochgetürmte Wellen. Letztere geben insbesondere einen Widerhall der Schüsse nach Vögeln, erstere ein vernehmliches Echo der Worte, welche durch ein Sprachrohr gerufen werden.

Viele Erscheinungen führen auf die Vermutung, dass gekrümmte Flächen und höhlenartig gewölbte Räume zur

Antwort. 1) Sobald die Luft nicht völlig frei, sondern gegen einen festen Körper gestützt ist, muß der reflektierte Schall, weil dessen Wellen einen Widerstand finden, vermehrt werden. Befinden sich außerdem an den Seiten Bäume oder sonstige feste Gegenstände, so gleicht die Luft der in einer Röhre eingeschlossenen, und die Schallwellen werden daher weiter fortgepflanzt werden.

2) Die reflektierenden Flächen sind meistens gekrümmt, sammeln daher mehrere Schallstrahlen und vereinigen sie zu einem lauter hörbarem Schalle. Sie gleichen gewissermassen den Sprachgewölben. (Siehe dort.)

3) Hauptsächlich tragen aber zur Verstärkung des Schalles die Bebungen bei, in welche die reflektierenden Körper versetzt werden, und so eine Art Resonanz erzeugen. Dass elastische und gespannte Körper (wie Glasscheiben, Gläser, Stahlstäbe, die Saiten der Instrumente usw.) durch einen

Erzeugung eines Echos am meisten geeignet sind, denn es geben verfallene Türme, gekrümmte Ufer, Bergschluchten u. dergl. oft die schönsten Echos. Alle vielsilbigen guten Echos, die Paul Reis beobachtete, rührten von konkav gekrümmten Hügelwänden her. Endlich kann aber auch durch eine von der Oertlichkeit herbeigeführte Durchkreuzung der Schallwellen in der Luft eine für die Bildung des Echos günstige Resonanz eintreten.

Schall leicht in so starke Schwingungen versetzt werden, dass sie zittern oder selbst einen hörbaren Schall hervorbringen, ist längst bekannt, und dass alle mit dem tönenden in Verbindung stehenden oder durch einen starken Schall getroffenen Körper, selbst die weniger elastischen, eine gleiche Wirkung zeigen, ist durch Chladni und Savart erwiesen.

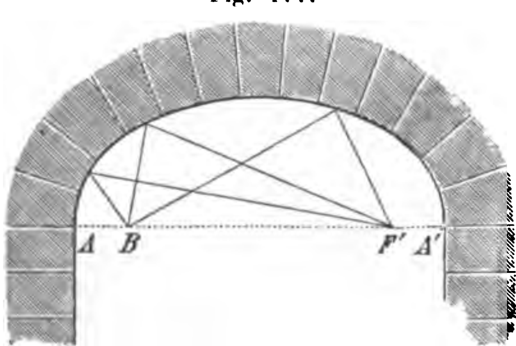
Frage 920. Wie erklärt es sich, dass ein durch Reflexion an den Stämmen eines entfernten Tannenwaldes erzeugtes Echo von etwas längerer Dauer ist, als der kurze Schall der das Echo hervorrief?

Erkl. 850. Gehen wir gegen das Gehölz vor, so wird das Echo allmählich immer schwächer, bis es schließlich ganz verschwindet. Alsdann bemerkt man einen eigenartigen helltönenden Schall, den Nachhall, den wir sogar innerhalb des Gehölzes wahrnehmen können.

Antwort. Es bilden sich bei jedem Stamme Wellenoberflächen aus, welche bei ihrer Ausbreitung wieder einhüllende Schallwellen erzeugen, die unser Ohr erreichen, (Akustik, I. Band, Seite 76). Auch die hinter der vordersten Reihe stehenden Bäume wirken hierbei mit, so dass der Schall gewissermassen in das Gehölz eindringt.

Frage 921. Welche eigentümlichen akustischen Erscheinungen kann man häufig in Gebäuden mit gekrümmten Mauern und gewölbten Decken infolge der nach den geometrischen Gesetzen bestimmten Reflexion des Schalles beobachten?

Fig. 477.



Antwort. Derartige Räume konzentrieren gleichwie Hohlspiegel (siehe Antwort 907), die von einer schwachen Schallquelle ausgehenden Wellen nach einem entfernten Punkte, so dass hier der schwache Ton hörbar wird, während er in anderen Punkten unbemerkar ist. Ganz besonders tritt diese Erscheinung in ellipsenförmigen Gewölben ein, wie ein solches in der nebenstehenden Figur im Durchschnitt dargestellt ist. Im Innern des Gewölbes sind zwei Punkte, welche die **Brennpunkte** genannt werden, weil in jedem derselben (B und F') sich alle Strahlen sammeln, die, von dem andern Punkte ausgehend, an dem Umkreise reflektiert werden.

Stellt man sich in den einen Brennpunkt F' so hört man deutlich, was in dem andern Brennpunkte B leise gesprochen wird. Der Standpunkt des Beobachters und der Ort der Tonquelle können hierbei miteinander vertauscht werden. (Siehe Seite 52 und 53 im ersten Bande der Akustik).

Frage 922. Auf welche Weise hat Mach diese in elliptischen Gefäßen stattfindenden Wellenreflexionen experimentell nachgewiesen?

Antwort. Mach erzeugte in dem einen Brennpunkte eines elliptischen Gefäßes elektrische Funken; waren dieselben klein, so entstanden im andern Brennpunkte scharf gezeichnete Staubfiguren; starke Funken gaben nur verschwommene Figuren, gleichwie tiefe Knalle, weil dafür die reflektierenden Flächen zu klein waren. Bei ähnlichen Versuchen von Schellbach und Böhm (1879) entstand im andern Brennpunkte ein Staubhäufchen, von Staubringen umzogen. Als die Funken ganz nahe am Rande überschlugen, entstanden rings um die Peripherie gegen die Wand normale Staubrippen, an der gegenüberliegenden Stelle aber eine stärkere Anhäufung, woraus ersichtlich ist, dass nach beiden Seiten am Rande der Ellipse Wellen herumlaufen, die an den diametralen Stellen interferieren.

Erkl. 851. Auf den erwähnten Erscheinungen beruhen die Flüstergewölbe und -galerien. Im Theater zu Mainz kann man sich während der geräuschvollsten Zwischenakte am einen Ende der zweiten Logenreihe mit Personen am andern Ende derselben unterhalten, ebenso an beiden Enden des langen Ganges hinter dem Rondel, während an der Wand dazwischen der Schall schwächer gehört wird. Eine ähnliche Erscheinung zeigt sich im sogenannten Karyatidensaale des Pariser Louvre, dessen Decke ihrer ganze Länge nach zylindrisch gewölbt ist. Gegen beide Enden des Saales sind zwei Vasen aufgestellt. Spricht jemand in die eine Vase leise hinein, so hört eine andere Person, welche in die zweite Vase hineinhorcht, die geflüsterten Worte, als kämen sie aus dieser Vase heraus. Die von der ersten Vase schräg aufwärts nach dem Mittelpunkte der gewölbten Decke gehenden Schallstrahlen werden nämlich alle in die zweite Vase geworfen.

Frage 923. Welche eigenartige Erscheinung bezeichnet man als das sogenannte pfeifende, tönende oder flötende Echo?

Antwort. Das tönende Echo entsteht durch die an den Stäben eines Gitters rasch hintereinander erfolgenden Reflexionen des Schalles eines Fußtrittes oder eines Schlages. R. von Fischer-

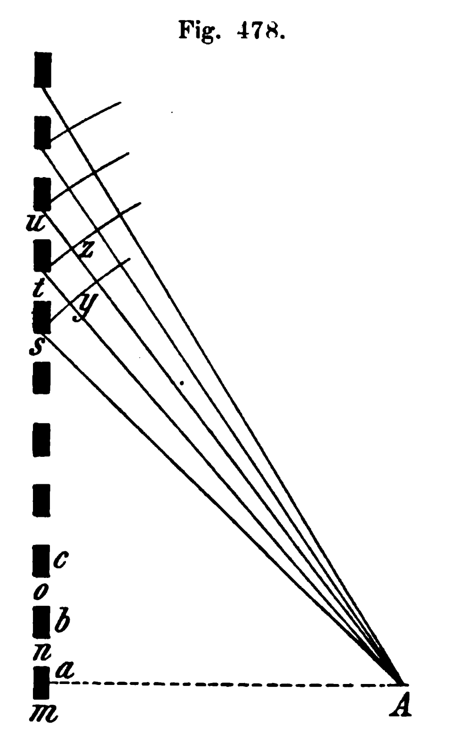
Erkl. 852. Aehnliche Töne wie bei solchen Gittern hört man auch, wenn man auf einem See vor einer Schilfwand in die Hände klatscht oder auf den Rand des Bootes klopft. Auch mag hierher der eigentümliche Ton gehören, den man auf der Freitreppe der Regensburger Walhalla hört.

Professor Lagally schreibt darüber (in der Naturw. Wochenschrift 1902): „Am auffälligsten ist das Echo bei der aus zwei einander gegenüberliegenden Fluchten von je 56 Stufen bestehenden zweiten Treppe, die längs einer senkrechten Wand von 8 m Höhe emporführt. Jedes Geräusch (der Schall der Fußtritte, das Aufstoßen des Spazierstockes) ruft einen Widerhall, ein nachtönendes Klingen hervor, mit dem Schalle vergleichbar, welcher entsteht, wenn man einen Stein durch kräftigen Wurf über eine dünne Eisfläche gleiten läßt. Wenn eine der 56 Stufen eine einzelne Schallwelle erzeugt, so wird diese von der senkrechten Wand jeder Stufe zurückgeworfen. Es entstehen also 56 reflektierte Wellen, welche in regelmäßigen Zwischenräumen nacheinander das Ohr treffen; denn da die Stufenbreite 31,5 cm beträgt, so muß die ursprüngliche Welle 31,5 cm zurücklegen, ehe sie von der folgenden senkrechten Wand zurückgeworfen wird, und die zurückgeworfene Welle hat ebenfalls einen um 31,5 cm längeren Weg zurückzulegen, bevor sie das Ohr trifft. Die an den einzelnen der 56 Stufen reflektierte Welle wird also in 56 Wellen zersplittert, welche nach der Zurücklegung einander in regelmäßigen Abständen von 31,5 + 31,5 = 63 cm folgen. Da die Schallgeschwindigkeit in der Sekunde 333 m (bei 0°) beträgt, so treffen in der Sekunde etwa 33300 : 63 = 530 Stöße unser Ohr, was ungefähr dem Tone *c*" entspricht.

Benzon in Kiel äußert sich darüber (in der Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht, I. Jahrg. S. 116) in folgender Weise:

„Geht man in einiger Entfernung an einem gewöhnlichen hölzernen Gitter vorüber, und ist der Weg derart, dass das Geräusch der Schritte deutlich ist, so hört man unmittelbar nach jedem Schritte einen ziemlich hohen eigentümlich pfeifenden, sehr rasch verklingenden Ton. Derselbe erscheint bei genauerem Hinhören weder von gleichbleibender Höhe noch Intensität. Die

Fig. 478.



Intensität wächst rasch und nimmt dann wieder langsamer ab. Die Höhe scheint allmählich abzunehmen. Die Dauer des Tones ist außerordentlich kurz, und seine Intensität ist so gering, dass derselbe bei dem gewöhnlichen Straßengeräusche einer Stadt leicht unbeachtet bleibt. Begibt man sich

Gibt man diesen Ton mit einer Pfeife an, oder singt man ihn gegen die Treppe, so kommt derselbe auffällig stark, rein und andauernd zurück. Erst nach 3 bis 4 Sekunden ist er, allmählich abschwellend, verklungen. Auch die nächst höhere und nächst tiefere Oktave des Tones sowie die Quinte bringen ähnliche, wenn auch schwächere Wirkungen hervor. Singt man jedoch einen andern Ton, so verhallt er wirkungslos; denn es fallen dann die von den einzelnen Stufen reflektierten Teile der einen Welle nicht mehr mit den entsprechenden Teilen der andern Welle zusammen. Die reflektierten Wellenteile verstärken sich nicht gegenseitig, sondern vernichten sich, so dass keine Nachwirkung entstehen kann. Aus dem Gewirr von Tönen, die in einem Geräusche enthalten sind, trifft die Treppe eine Auslese, indem derjenige Ton auf den die Treppe gewissermaßen abgestimmt ist, sowie seine nächst höhere und seine nächst niedere Oktave erhalten werden."

an weniger besuchte Plätze, namentlich in der Nacht, und stellt sich in der Nähe eines Gitterwerks auf, so genügt ein Tritt auf den Kiesgrund des Weges oder auf einen Stein, um den eigentümlichen Ton deutlich erklingen zu lassen; er hat dann einige Aehnlichkeit mit dem Pfeifen eines Sperlings. Dieser Ton scheint folgendermaßen zu entstehen: Einer Reihe von vierkantigen Gitterstäben gegenüber, werde an einer Stelle A (Fig. 478) eine Erschütterungswelle erregt, die sich allmählich bis an immer entfernter gelegene Gitterstäbe fortpflanzt. Die Reflexion der Welle kann sowohl an den Vorderflächen der Gitterstäbe, als auch an den Seitenflächen erfolgen, aber der nach A reflektierte Schall wird um so schwächer, je spitzer der Winkel ist, unter dem die Welle die Fläche trifft. An den Vorderflächen abc wird der Schall merklich nur von den ersten Stäben reflektiert werden. Umgekehrt stellt es sich mit den Seitenflächen $mno\ldots$, hier trifft die Welle die ersten Flächen unter sehr spitzem Winkel, der Winkel wächst aber rasch und nähert sich 90° immer mehr. Von den weiter entfernten Gitterstäben wird daher der Schall an den Flächen $s, t, u\ldots$ merklich reflektiert. Es kommen also in A nacheinander reflektierte Wellen an, welche, wenn ihre Wegeunterschiede $2ty$, $2uz$ usw. einander gleich sind, für ein in A befindliches Ohr einen Ton erzeugen.

Frage 924. In welcher Weise kann man sich der Schallreflexion zur Abschätzung einer Entfernung, z. B. der Tiefe eines Brunnens bedienen?

Erkl. 853. Arago hatte vorgeschlagen, die Tiefe eines Sees oder eines Meeres

Antwort. Die Tiefe eines Brunnens läßt sich nach der folgenden, von Newton aufgestellten Formel berechnen, worin x die gesuchte Tiefe und t die Zeit bezeichnet, die zwischen dem Augenblicke vergeht, in welchem man

durch die Rückkehr des auf dem Boden reflektierten Schalles zu messen. Colladon stellte nach dieser Richtung hin auf dem Genfer See eine Reihe von Beobachtungen an, aus denen hervorgeht, dass ein starker Ton unter Wasser auf Entfernungen von mehr als 100 km zu hören ist, aber er äußert sich nicht über die Möglichkeit, die Tiefe vermittelst des Echos am Grunde zu messen.

einen Stein von der Oeffnung herabfallen läßt und demjenigen, in welchem man sein Auftreffen auf die Wasserfläche hört:

$$t = \sqrt{2\,x/g} + x/c,$$

hierin bedeutet g die Beschleunigung des freien Falles (9,81 m), und $c = 340$ m, wenn die Zeit in Sekunden, die Länge in Metern ausgedrückt wird. Denn nach den Fallgesetzen (s. Lehrb. d. Dynamik, Seite 198) braucht der Körper zum Hinabfallen die Zeit

$$t = \sqrt{2x/g},$$

während der Schall dieselbe Strecke in der Zeit $t = x/c$ zurücklegt; beide Größen sind dann zu addieren.

Anmerkung XXXI: Dass die Empfindung eines Tones auch durch wiederholte Zurückwerfung irgend einer Lufterschütterung zwischen zwei hinlänglich nahen parallelen Wänden möglich ist, zeigt sich in langen Gängen, schmalen Zimmern, engen Straßen und überall da, wo zwischen parallelen nicht über 6 m entfernten Wänden eine momentane Schallerregung stattfindet. Der auf solche Weise erregte Ton ist zugleich das einfachste Mittel zur Beurteilung der Abweichung zweier Wände von der parallelen Lage, sowie zur Schätzung ihrer Distanz. Nimmt in einem solchen Gange die Tonhöhe des durch die Schritte erzeugten Klanges, z. B. um eine kleine Terz oder um einen halben Ton plötzlich zu oder ab, so ist daraus ersichtlich, dass der Gang hier um $^1/_6$ resp. um $^1/_{16}$ seiner anfänglichen Breite enger oder breiter geworden ist. Wird der Ton allmählich tiefer, so wird der Weg allmählich breiter. Geben die widerhallenden Tritte den Ton c' (von 130 cm Wellenlänge), so sind die Wände von dem Dahinschreitenden zur Rechten und Linken um 130 cm entfernt. (J. J. Oppel, Poggend. Annalen 147 Bd. 1872.)

Anmerkung XXXII: Als vorzügliche, teils als berühmte Echos sind die folgenden zu erwähnen. Ebel beobachtete, dass ein vorzügliches Echo der Ruine Derenburg bei Halberstadt 27 Silben wiederholte. Dieses Echo hat aufgehört, seitdem eine Mauer der Feste niedergerissen ist. In Heidelberg gibt es ein Echo, welches geeignet ist, das Rollen des Donners und die abwechselnde Verstärkung und Schwächung seines Schalles anschaulich zu machen. Ein Pistolenschuß, von einer etwas tieferen Stelle des Heiligenberges ausgehend, wird aus einer gegenüberliegenden Bergschlucht reflektiert, so dass man etwas weiter aufwärts, zur Seite und hinter der Schallquelle den Knall nicht direkt, wohl aber sein Echo hört, und zwar donnerähnlich mit einigen wiederkehrenden Verstärkungen bis zum allmählichen Verschwinden. — Beim Loreleyfelsen, da wo die Nahe in den Rhein mündet (von Bingen nach Koblenz zu), wiederholt ein schönes Echo ein einsilbiges Wort 17 mal. Man hört dabei denjenigen, welcher redet oder ein Instrument bläst, wenig oder gar nicht, das Echo aber sehr deutlich und mit vielfachen Verschiedenheiten, indem die Stimme desselben bald näher, bald ferner herzukommen scheint, zuweilen sehr laut, dann wieder leiser

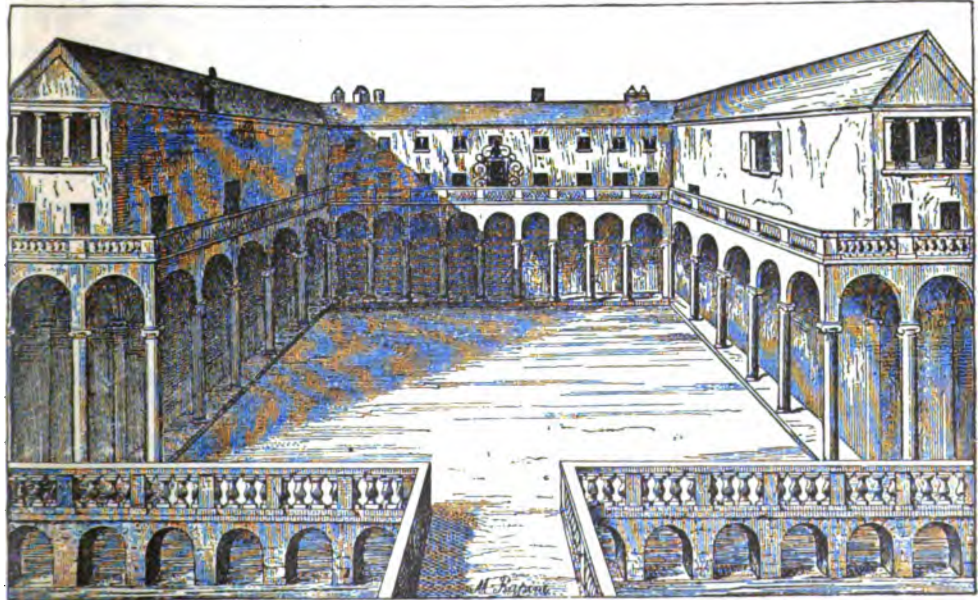
tönt; auch glauben verschiedene Personen das Echo, die eine links, die andere rechts zu hören. — Auf dem kreisrunden Königsplatze zu Kassel bilden die ihn umgebenden Häuser die zurückwerfende Wand, den Mittelpunkt des Kreises bezeichnet ein aus weißen Steinen gepflasterter Stern, und eine hier gerufene Silbe wird besonders in der Nacht, neunmal vom Echo wiederholt; die von den Häusern zurückgeworfenen Wellen gehen nach dem Mittelpunkte zurück und durch denselben hindurch zu den gegenüberstehenden Häusern, kehren auch von da nach dem Mittelpunkte zurück und gehen wieder durch ihn hinüber. — Acht Kilometer von Warmbrunn in Schlesien liegt auf dem Gipfel eines Berges die Burg Kynast; ihr gegenüber erhebt sich, durch ein schmales tiefes Tal, die Helle, vom Kynast getrennt, der Heerdberg. Wird nun vor dem Turme der Burg, nach dem Heerdberge zu, eine Trompete geblasen, so wiederholt das Echo deutlich einmal acht Töne.

Im Jahre 1692 beschrieb der Benediktiner Quesnet das Echo zu Genetay. Derjenige, welcher singt, hört dabei nur seine eigene Stimme, die Zuhörer aber an den geeigneten Stellen nur den Widerhall, und zwar so, dass das Echo sich bald zu nähern, bald zu entfernen scheint; der eine hört nur ein einfaches, ein anderer ein mehrfaches Echo, dieser zur Rechten, jener zur Linken. Quesnet erklärt diese Erscheinung aus der länglichen Gestalt des Hofes und der ihn einschließenden Gebäude.

Ein ausgezeichnetes Echo bei Verdun ist durch Teintürier (1710) beschrieben. Dieses wird durch zwei vom Hauptgebäude getrennte Türme gebildet, 50 m voneinander abstehend, der eine mit einem niedrigen gewölbten Zimmer, der andere mit einem gewölbten Eingange. Stellt man sich in die Mitte zwischen beide, so hört man ein laut geredetes Wort 12 bis 13 Male in gleichen Zwischenräumen stets schwächer wiederholt. Tritt man auf einige Entfernung aus der Verbindungslinie beider Türme, so hört das Echo ganz auf; kommt man aber auf eine Linie zwischen dem Hauptgebäude und einem der Türme, so hört man ein einfaches Echo. Hier müssen also die beiden Türme sich die Schallstrahlen wechselsweise zuwerfen.

Fig. 479.





Ein Echo an den Ufern des Sees del Lupo oberhalb der Wasserfälle von Terni (Italien) wiederholt 15 mal. Eins der berühmtesten und schönsten Echos ist das beim Schlosse Simonetta, acht Kilometer von Mailand, von dem wir eine Zeichnung nach Kircher geben. Die Länge des Hauptgebäudes beträgt 37 m, an der inneren Seite gemessen, die Seitenflügel sind 20 m lang. Die Höhe des Oberstocks beträgt 10 m zwischen der Galerie und dem Dache; die Galerie ist 5 m breit. Das Echo wird hier durch die beiden vorspringenden Schloßflügel gebildet. Schießt man aus dem großen Fenster in der Wand des rechten Flügels eine Pistole ab, so wiederholt das Echo den Schall 40 bis 50 Male; ein lautes Wort wird 24- bis 30mal wiederholt. Addison und Monge haben die Tatsache bestätigt; Bernoulli will gar eine 60-fache Wiederholung gehört haben.

Plot hörte bei dem berühmten Echo in dem Parke des englischen Schlosses Woodstock bei Oxford in einer Entfernung von rund 700 m bei Tage 17, bei Nacht 20 Silben, was auf 35 m eine Silbe betragen würde.

„Besucher von Killarney werden sich des schönen Echos in der Kluft von Dunloe erinnern. Wenn eine Trompete an der richtigen Stelle in der Kluft geblasen wird, so erreichen die Schallwellen nacheinander nach 1, 2, 3 oder mehreren Reflexionen von den umgebenden Klippen das Ohr und sterben in den sanftesten Klängen hin. Auch bei Rosenlaui in der Schweiz bilden die großen Klippen der Engelhörner einen tiefen Einschnitt, genannt das Ochsental, wo die Echos in wunderbarer Weise ertönen. Wird der Schall des Alpenhorns von den Felsen des Wetterhorns oder der Jungfrau zurückgeworfen, so klingt er zuerst rauh; doch bei den folgenden Reflexionen werden die Töne sanfter und flötenähnlicher. Infolge der allmählichen Abnahme der Stärke scheint sich die Quelle des Schalles tiefer und tiefer in die Eis- und Schneewüsten zurückzuziehen."

„Ein Brunnen von 70 m Tiefe und 4 m Breite befindet sich in Carrisbrook Castle auf der Insel Wight. Das Innere ist mit glattem Mauerwerk bekleidet. Fällt eine Nadel in den Brunnen, so hört man sie auf das Wasser aufschlagen. Hustet oder ruft man in den Brunnen hinein, so tönt es einige Zeit nach. — Als sich Wheatstone dicht vor den obern Teil der Mauer des Londoner Colosseums stellte, eines runden Gebäudes von 43,5 m Durchmesser, fand er, dass ein von ihm gesprochenes Wort oftmals wiederholt wurde. Ein einfacher Aufruf klang wie ein schallendes Gelächter, während das Zerreißen eines Stückchens Papier einem Hagelwetter glich." (Tyndall).

Gassendi erzählt von einem Echo beim Grabmale der Metella. Man sieht da einen runden Turm mit Mauern von 7,5 m Dicke, und an demselben 200 marmorne Stierhäupter, zur Erinnerung an zwei, beim Begräbnis der Tochter des Metellus Crassus geopferte Hekatomben. Das Volk nennt dieses Monument Capo di bove, es liegt in der Nähe von St. Sebastian. Spricht man am Fuße des Hügels, welcher das Grabmal trägt, ein Wort mit lauter Stimme, so hört man es vielfältig widerhallen. Boissard berichtet, dass er diesem Echo einen achtsilbigen Vers zugesungen habe, worauf er denselben erst achtmal deutlich, dann noch mehrmals verwirrt widerklingen hörte.

Das Echo zu Roseneath in der Grafschaft Argyle, gibt 8 bis 10 Trompetentöne, schweigt dann einige Zeit und wiederholt dann das Stück noch zweimal, doch immer schwächer als vorher. — Bei Adersbach in Böhmen ist ein merkwürdiges Felsenmeer, bestehend aus einer Gruppe von etwa 1000 Felsen. Einzelne derselben in einem Umkreise von 25 km verstreut, bilden das Gerippe eines Berges, und ragen größtenteils bloß mit ihren nackten Spitzen em-

per. Da, wo sich diese Felsengruppe schließt, ist das Echo, welches 7 Silben oder 7 auf dem Waldhorn geblasene Töne dreimal wiederholt, zuerst ziemlich stark, dann schwächer, endlich fast ersterbend, aber noch vollkommen deutlich, ohne sie im mindesten zu verwirren. Das phonische Zentrum ist in einer kleinen Entfernung von der höchsten Felsenspitze; dort stehend, hört man auch leise gesprochene Worte sehr deutlich, entfernt man sich aber nur einige Schritte nach der einen oder andern Seite, so gibt selbst ein Pistolenschuß kein Echo.

In Bezug auf Flüstergewölbe sei noch folgendes erwähnt: Ein ausnehmend schönes Echo wird in der Mitte der katholischen Kirche in Darmstadt gehört und entsteht durch Reflexion der Schallwellen an der gewölbten 47 m hohen Kuppel. Dieses Echo ist so laut und klar, dass die ursprünglichen und die reflektierten Worte von einem nahe bei dem Redner stehenden Beobachter gleich stark gehört werden. — Das Ticken einer Uhr kann von dem einen Ende der Kirche in der Abtei von St. Albans bis zum andern gehört werden. — Eine achteckige Galerie in der Kathedrale zu Gloucester trägt ein leises Gespräch 25 m weit über das Schiff der Kirche. — Die große Kuppel der St. Paulskirche zu London ist derart gebaut, dass zwei Personen, welche sich an entgegengesetzten Punkten der inneren Galerie oberhalb der Trommel der Kuppel befinden, ganz leise miteinander sprechen können. (S. Antwort 874.)

In der berühmten Felsengrotte bei Syrakus wandelt sich das leiseste Geräusch zu einem bedeutenden Lärme um. In den Kellern des Pariser Pantheon braucht der Führer, der dieselben den Fremden zeigt, nur einen kurzen Schlag auf den Rockschoss zu tun, so klingt das wie Kanonendonner. Wirft man in die Smellenhöhle bei Viborg in Finnland ein lebendes Tier, so hört man ein furchtbares Heulen und Brausen.

F. Die Brechung und Beugung des Schalles.

Frage 925. Welche Erscheinung versteht man unter der Brechung oder Refraktion des Schalles?

Antwort. Unter der Brechung oder Refraktion des Schalles versteht man die Erscheinung, dass die Schallstrahlen eine Ablenkung von ihrer Richtung erfahren, wenn sie in ein Medium von anderer Schallgeschwindigkeit übergehen.

Frage 926. Nach welchen Gesetzen geht die Brechung der Schallstrahlen in einem solchen Falle vor sich?

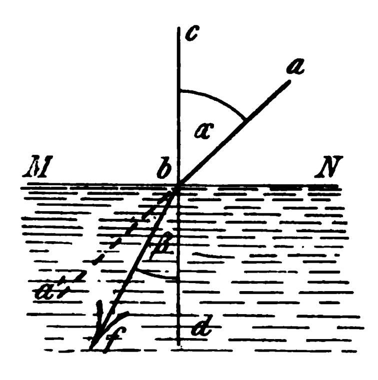
Antwort. Ueber die Brechung der Schallstrahlen lassen sich die folgenden Gesetze nachweisen:

1) Der einfallende und der gebrochene Schallstrahl liegen mit dem Einfallslote in einer Ebene, aber auf entgegengesetzten Seiten desselben.

Erkl. 854. Analoge Gesetze werden wir bei den Brechungserscheinungen der Lichtstrahlen kennen lernen. Zum besseren Verständnis derselben mögen

die folgenden Begriffsbestimmungen dienen: MN (Fig. 480) sei die Trennungsfläche zweier Mittel (z. B.: zwischen Luft und Kohlensäure), und zwar entspreche der schraffierte Teil demjenigen Mittel, in welchem sich der Schall langsamer fortpflanzt (wie es in der dichteren Kohlensäure der Fall ist, in welcher nach Erkl. 753 $c' = 259$ m beträgt). $a\,b$ ist der einfallende Strahl, $b\,f$ seine Richtung in dem andern Mittel; dann nennt man die Linie $c\,b\,d$, welche in dem Punkte b, in welchem der einfallende Strahl die Trennungsfläche trifft, senkrecht steht, das Einfallslot, den Winkel $a\ b\ c\ (\alpha)$, welchen der einfallende Strahl ab mit dem Einfallslote $c\,b$ bildet, den Einfallswinkel. $b\,f$ den gebrochenen Strahl und den Winkel $f\,b\,d\ (\beta)$, den der gebrochene Strahl $b\,f$ mit dem Einfallslote $b\,d$ bildet, den Brechungswinkel.

Fig. 480.



Die beiden wichtigsten der nebenstehenden Gesetze wurden bereits im ersten Bande unserer Akustik erwähnt, und auch die beiden ältesten Experimentalbeweise derselben angedeutet, welche hier eine Erweiterung und Ergänzung finden sollen. (Siehe I. Bd., Seite 84.)

2) **Stehen die Schallstrahlen senkrecht auf der Oberfläche des neuen Mediums, so gehen sie ungebrochen weiter, dagegen werden schief auffallende Strahlen gebrochen, und zwar um so stärker, je schiefer sie auffallen.**

3) **Geht der Schall aus einem Mittel in ein anderes über, in welchem seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit kleiner ist als im ersteren, so ist auch der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel, oder der Schallstrahl wird zum Einfallslote gebrochen. Geht dagegen der Schall aus einem Mittel in ein solches über, in welchem seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit größer ist, als im vorigen, so wird auch der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel oder der Schallstrahl wird vom Einfallslote gebrochen.**

4) **Bei dem Durchgange durch dieselben beiden Mittel stehen der Sinus des Einfallswinkels α und der Sinus des Brechungswinkels β in einem konstanten Verhältnisse (dem Brechungsverhältnisse), welches dem Verhältnisse der Schallgeschwindigkeiten in beiden Medien gleich ist oder**

$$\sin\alpha : \sin\beta = c : c'.$$

5) **Schallstrahlen, welche in einem Medium von geringerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit die Oberfläche desselben so schief treffen, dass**

der Brechungswinkel größer als 90° sein müßte, gehen in ein Medium, dessen Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die Schallwellen größer ist, nicht über, sondern werden vollständig in das erstere Medium zurückgeworfen.

Frage 927. Auf welche Weise zeigte C. Sondhaus (1852) das Dasein der Schallbrechung?

Antwort. C. Sondhaus zeigte das Dasein der Schallbrechung mittelst großer, aus Kollodiumhäutchen gebildeter Linsen, welche mit kohlensaurem Gas gefüllt waren, und die einen Brennpunkt (oder einen Konzentrationspunkt) für die zusammentreffenden Schallstrahlen deutlich erkennen ließen. (Siehe Erkl. 855.)

Als Sondhaus eine Uhr in die Achse dieser Schalllinse (in den Punkt S, Fig. 481) brachte, hörte er auf der anderen Seite der Linse in einem bestimmten, auf der Linsenachse gelegenen Punkte ihr Ticken am stärksten; nach diesem Punkte hin waren also die meisten der Schallstrahlen gebrochen worden. Befanden sich die Uhr oder das Ohr außerhalb der Linsenachse, so konnte das

Erkl. 855. Die für die Schallstrahlen bestimmte Linse wurde aus Kollodiumhäutchen angefertigt, die als Segmente einem großen Kollodiumballon entnommen und zu beiden Seiten eines schmalen Blechstreifens (von 30 cm Durchmesser bei 6 cm Breite) befestigt wurden. Der Reif enthielt zwei mit Hähnen versehene Röhren 0 0 (Fig. 481), durch welche man die Kohlensäure in die Linsenhüllen so lange füllen konnte, bis dieselben straff und als Linse gewölbt erschienen. Die Höhe der mit Kohlensäure aufgeblasenen Kugelsegmente betrug 67 mm. Die Schalllinse bekam ein Stativ, wie es für optische Linsen gebräuchlich ist.

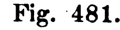
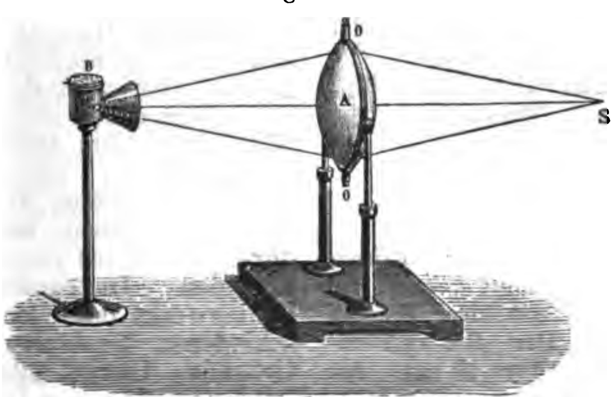


Fig. 481.



Erkl. 856. Als der Abstand der auf der Linsenachse befindlichen Uhr von

der Linse 130 bis 160 cm betrug, lag der Durchschnittspunkt der meisten Schallstrahlen 40 cm jenseits der Linse auf der Achse; für parallele Schallstrahlen war der Vereinigungspunkt etwa 35 cm von der Schalllinse entfernt.

Zum Zwecke der auf der Membrane hervorzubringenden Sandbewegung wurden die Schallstrahlen von einem blechernen Trichter *C* aufgefangen, dessen Achse mit jener der Linse zusammenfiel, und der dann unter rechtem Winkel ein Rohr besaß, welches oben mit der feinen Membrane geschlossen war. Wenn demnach die Achsen wagerecht lagen, so war das mit der Membrane oben geschlossene Winkelrohr lotrecht gerichtet.

Ursprünglich war der Versuch an einem Luftballon aus Goldschlägerhäutchen gemacht worden. Man hatte bei einem solchen, wenn er vom Wasserstoff oder vom Leuchtgase aufgebläht war, (siehe Seite 80 im ersten Bande der Akustik) den auf der einen Seite erregten Schall auf der andern Seite in der Achse deutlicher vernommen, als außerhalb der Achse.

Ticken der Uhr jenseits der Linse nur sehr schwach oder gar nicht vernommen werden. Je weiter die Schallquelle auf der Linsenachse von der Linse entfernt wurde, desto näher rückte der jenseitige Punkt der größten Schallstärke an die Schalllinse, ganz so wie es die Linsengesetze erfordern. Aus der in dem obigen vierten Gesetze gegebenen Formel berechnete Sondhaus sodann den Brechungsexponenten des Schalles der Kohlensäure.

Als Sondhaus eine tönende Orgelpfeife als Schallquelle vor der Schalllinse verwendete, konnte er jenseits der Linse im Brennpunkte eine zarte Membran ins Vibrieren und folglich feinen Sand, der auf die Membrane *B* gestreut worden war, in Bewegung kommen sehen.

Das Flüstern auf der einen Seite der Linse konnte jenseits im Maximalpunkte des Schalles wohl gehört, aber die Worte nicht deutlich unterschieden werden.

Frage 928. In welcher Weise hat C. Hajech (1856) mittelst eines Schallprismas die Brechungsgesetze für den Schall durch sorgsame Versuche nachgewiesen?

Antwort. Hajech wendete eine zylindrische metallische Röhre von großer, aber veränderlicher Länge an, welche durch die Wand zweier Säle ging. Die Röhre wurde an beiden Enden mit Membranen verschlossen und in eine zweite Röhre geschoben, welche am anderen Ende eine Büchse mit einem tönenden Instrumente (einem Schlagwerke mit Glocken von verschiedenen Tonhöhen, oder eine tickende Uhr) enthielt. Die Achsen dieser Röhren fielen stets ineinander. So lange die Röhre mit atmosphärischer Luft gefüllt war, hörte man (wie es die Gesetze der Wellenlehre fordern) den Schall immer in der Richtung der Achse am stärksten, die Membranen

Erkl. 857. Die Länge des als Prisma dienenden Rohres konnte von 15 cm bis 426 cm ohne merklichen Einfluß geändert werden. Der Röhrendurchmesser betrug im Lichten 77 mm. Als Membranen dienten Kollodiumhäutchen, verschiedene tierische Membranen, Papier und Glimmer. Als Beobachter wurden fein- und schwerhörige Personen gewählt, besonders weil die letzteren außerhalb der Richtung des Schallmaximums gar nicht hörten. R. König änderte den Versuch (1862) da-

hin ab, dass eine wagerechte Messingröhre, welche an einem Ende mittelst einer lotrechten, am andern Ende mittelst einer geneigten Membrane geschlossen ist, das Prisma bildet, welches man durch zwei Hähne mit einer tropfbaren Flüssigkeit oder einem Gase füllen kann. Der Ton, welcher durch das im Prisma enthaltene Schallmittel dringen soll, wird an einer Stimmgabel erregt, welche vor einer damit gleich gestimmten Resonanzröhre befestigt ist. Die beiden letzteren befinden sich vor der vertikalen Membrane im Inneren eines Kastens, dessen Wände mit Schalldämpfern versehen sind, damit der erzeugte Ton nur in das Schallprisma gelangen kann. Die Richtung, unter welcher der Ton am stärksten aus der geneigten Membrane hervortritt, wird leicht dadurch gefunden, dass man einen auf die tongebende Stimmgabel abgestimmten Resonator im Kreise vor der schiefen Membrane herumführt, während man eine kleine Messingröhre, die durch einen Kautschukschlauch mit dem Resonator in Verbindung steht, ins Ohr hält. Der Resonator liegt auf einer Stütze, deren Achse durch den Mittelpunkt der schiefen Membrane geht, und die Stimmgabel wird von einem Hammer angeschlagen, der durch einen Druck auf seinen aus dem Kasten hervorragenden Knopf gegen die Gabel schlägt und sie zum Tönen bringt. Hajech hat auf diesem Wege gefunden, dass die optischen Brechungsgesetze auch für den Schall ihre Anwendung finden.

mochten gegeneinander beliebig geneigt sein. Dasselbe war der Fall, wenn zwar die Röhre mit einem anderen Gase, aber mit Membranen an beiden Enden geschlossen wurde, die senkrecht zur Achse gerichtet waren. Sobald aber im letzteren Falle die Membranen schief gegen die Achse lagen, war der Ort des stärksten Schalles außer der Achse. Die Schallstrahlen hatten sich gebrochen.

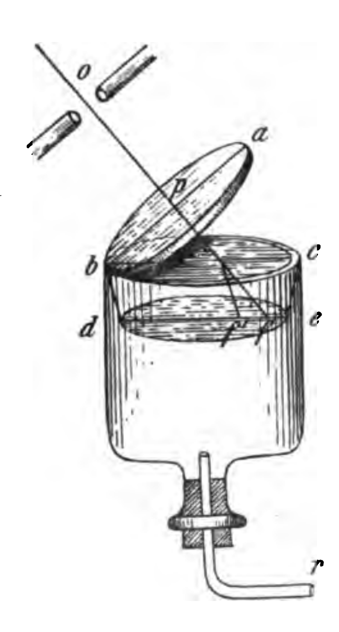
Im letzteren Falle hatte man nämlich ein Prisma aus einem von der atmosphärischen Luft verschiedenen Schallmittel, welches von den Strahlen des Schalles durchlaufen wurde, ehe diese in die atmosphärische Luft übertreten konnten. Bei diesem Uebergange verließen sie ihre gerade Richtung und wurden gebrochen. Zur Bestimmung des Brechungsgesetzes für den Schall waren auf jener Seite des Schallprismas, auf welcher der Schall in die Luft übertrat, auf dem Boden graduierte Kreisbögen gezogen, die ihren gemeinsamen Mittelpunkt in der lotrechten Projektion von der verlängerten Achse des Gasrohres (Prismas) hatten. War die Lage der größten Schallstärke gefunden, so bestimmte man die Richtung des Schallstrahles mit Hilfe eines Bleilotes, das man vom Ohr auf den Fußboden herabließ und den getroffenen Punkt zu den graduierten Kreisen in Beziehung brachte.

Frage 929. Durch welche Versuche von Schellbach und Böhm ist es (1879) gelungen, die Brechung des Schalles im Kleinen und die Geltung des Brechungsgesetzes nachzuweisen?

Antwort. Als Schallquelle wurde eine Kollodiumhaut benutzt, die über einen Ring *a b* (Fig. 482) gespannt war und durch elektrische Funken, die bei *o* übersprangen, in Schwingungen versetzt wurde. In das Gefäß *b c r* wurde

Erkl. 858. Eine wichtige Erscheinung ist die Brechung des Schalles in der Atmosphäre, welche die Folge der ungleichen Temperatur der Luftschichten ist, und welche die Fortpflanzungsrichtung des Schalles abändern kann, wie wir bereits bei der Besprechung der Nebelsignale (s. dort) erörtert haben. Nach Reynolds (1875) ist auch die Wirkung des Windes auf den Schall eine Brechung im großen. (Siehe Antwort 885 und 886.)

Fig. 482.



eine mit Kohle bestäubte Papiertafel *de* gebracht; war dasselbe mit Luft gefüllt, so entstanden Staubringe, deren Mittelpunkt f in der Achsenrichtung des Ringes, also in der Fortpflanzungsrichtung des Schalles lag. Wurde aber das Gefäß mit Kohlensäure gefüllt, so lag das Zentrum der Staubringe bei *f'*; hierdurch ist zunächst erwiesen, dass der Schall an der Grenzfläche *bc* bei dem Uebergange aus Luft in Kohlensäure gebrochen wird. Weiter sieht man aus dem Versuche, dass der Brechungswinkel kleiner ist als der Einfallswinkel, dass also der Schall bei dem Uebergange in das dichtere Medium zum Lote gebrochen wird; endlich ergab die Lage des Punktes *f'*, dass der Brechungsexponent (siehe Seite 81, I. Bd. d. Akustik) $\sin \alpha : \sin \beta = c : c'$ ungefähr $^5/_4$ betrug. So groß muß er aber nach der Theorie der Brechung auch sein, denn die Dichten der zwei Luftarten verhalten sich wie 2 : 3 oder wie 16 : 24, also verhalten sich nach der Formel $\sqrt{E/d}$ die Geschwindigkeiten umgekehrt wie die Wurzeln aus diesen Zahlen, also wie 5 : 4. Aehnliches wurde auch für den Uebergang des Schalles aus Wasserstoff in Luft gefunden; die Brechung war jedoch infolge der geringen Dichte des Wasserstoffs so stark, dass der Mittelpunkt der Ringe unter Umständen über den Gefäßrand hinausrückte.

Frage 930. Welcher Art waren die Experimentaluntersuchungen von Louis Perrot und F. Dussaud (1895) über die Brechung des Schalles?

Erkl. 859. Die folgende Tabelle enthält einige der von Hajech (1857 und 1859) gewonnenen Resultate, aus denen

Antwort. Eine senkrecht stehende Holztonne mit verschlossenem Boden war oben mit einer dünnen Kautschukmembran bespannt und fast ganz mit Wasser gefüllt; in den kleinen Luftraum über dem Wasser mündete ein seitliches Rohr, durch welches man eventuell die Luft verdünnen

ersichtlich ist, dass das Wasser, welches nahezu dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit besitzt, wie der Wasserstoff, auch nahezu dieselben Ablenkungen hervorbringt.

	Einfallswinkel	Brechungswinkel in Luft	
		Beobachtet	Berechnet
Wasser . .	35° 50′	7° 40′	7° 58′
	25° 00′	5° 40′	5° 37′
Wasserstoff	35° 50′	8° 00′	8° 50′
	25° 00′	7° 00′	6° 22′
Ammoniak	41° 00′	29° 20′	30° 22′
	35° 50′	25° 00′	26° 50′
Kohlensäure	35° 50′	49° 50′	48° 19′
	25° 00′	33° 20′	32° 33′
Schweflige	35° 50′	62° 30′	61° 22′
Säure . . .	25° 00′	40° 00′	39° 24′

konnte. Wurde etwas Wasser abgelassen, so drückte der äußere Luftdruck die Kautschukmembran nach innen, und die Grenze zwischen Wasser und Luft bildete eine gekrümmte Fläche. In der Mitte des Wassers in der Tonne befand sich eine gellende elektrische Klingel. Die Krümmung des Meniskus wurde von dem einen Beobachter durch eventuelles Aussaugen der Luft möglichst konstant erhalten, während andere Beobachter von einem erhöhten Standpunkte aus mittelst eines Hörrohres und langen Hörschlauches die Richtung der gebrochenen Schallwellen beobachtete.

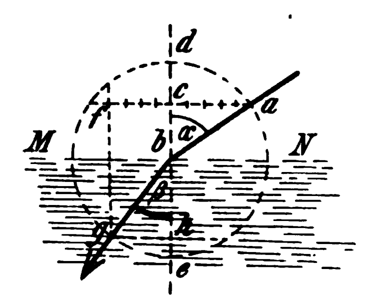
Schon die ersten Versuche ergaben eine ungemeine Verstärkung des Schalles längs der Hauptachse. Das Vorhandensein von Brennpunkten auf der Achse war jedoch schwieriger nachzuweisen. Ein Punkt größter Intensität ließ sich mit dem Hörrohre niemals auf der Achse nachweisen, dagegen beobachtete man in einem bestimmten Abstande eine Ebene in der Luft, in welcher die Verstärkung des Tones eine plötzlichere war, als in jeder andern; gleichzeitig schien in dieser Ebene an dem Punkte, wo die Achse geschnitten wurde, der Ton klarer und metallischer zu sein als an andern Punkten. Dieser Luftquerschnitt wurde als eine Art Brennebene aufgefaßt, welche den Ort enthielt, an dem die Strahlen am meisten konzentriert waren.

Frage 931. Auf welche Weise läßt sich mit Hilfe des oben erwähnten Brechungsgesetzes (Antwort 926, 2) die Lage des gebrochenen Strahles durch Konstruktion finden, wenn man die Lage des einfallenden Schall-

Antwort. In der nebenstehenden Figur 483 sei MN die Trennungsfläche zweier verschieden dichten Medien, und das untere schraffierte Medium das dichtere, sowie ab der einfallende Schall-

strahles und den Brechungsexponenten kennt?

Fig. 483.



strahl. Man beschreibt vom Fußpunkte b dieses einfallenden Strahles $a\,b$ mit beliebigem Radius einen Kreis und fällt von dem Schnittpunkte a dieses Kreises mit dem einfallenden Strahle eine Senkrechte $a\,c$ auf das Einfallslot $d\,e$. Diese Linie $a\,c$ ist der **Sinus des Einfallswinkels.** Für den Uebergang aus atmosphärischer Luft in Kohlensäure ist nach Antwort auf Frage 929 der Sinus des Einfallswinkels 5 und der des Brechungwinkels 4. Man teilt daher a c in 5 gleiche Teile, trägt 4 dieser Teile auf die Verlängerung $c\,f$ auf, zieht durch f mit $d\,e$ die Parallele $f\,g$ und verbindet endlich b mit g. Dann ist $b\,g$ der zu dem einfallenden Strahle $a\,b$ gehörige gebrochene Strahl in Kohlensäure und $g\,b\,h$ der Sinus des Brechungswinkels.

Erkl. 860. Gleichwie bei der Reflexion so besteht auch bei der Brechung zwischen Schall und Licht eine Aehnlichkeit, indem die Schallstrahlen, sowie die Lichtstrahlen eine Brechung erfahren, sobald sie aus einem Medium in ein anderes von größerer oder geringerer Dichte übergehen. Die Lichtstrahlen, welche aus dem Wasser in schräger Richtung austreten, ändern an der Oberfläche ihre ursprüngliche Richtung,sobald sie in die Luft gelangen, und die Abweichung ist um so stärker, je schräger sie gegen die Oberfläche stoßen. Die Wirkung der Prismen und Glaslinsen beruht nur auf dieser Brechung der Lichtstrahlen, wenn sie aus Luft in Glas und aus Glas wieder in Luft treten.

Frage 932. Unter welchen Umständen wird ein Schallstrahl vom Einfallslote gebrochen?

Antwort. Geht der Schall aus einem Mittel in ein anderes über, und ist seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit im letzteren Mittel größer als im ersteren, so ist auch der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel, oder der Schallstrahl wird vom Lote gebrochen. (Siehe das 3. Gesetz in Antwort 926.)

Erkl. 861. Das nebenstehende Gesetz entspricht dem Brechungsgesetze über Lichtstrahlen: Geht ein Lichtstrahl aus einem dichteren Medium in ein dünneres über, so wird er gewöhnlich vom Lote gebrochen, und sein Brechungswinkel ist größer als sein Einfallswinkel.

Frage 933. Was tritt ein, wenn der Einfallswinkel des Schallstrahles in dem vorerwähnten Falle von Null aus immer mehr zunimmt?

Erkl. 862. Das entsprechende Gesetz für Lichtstrahlen lautet: Lichtstrahlen, welche in einem dichteren Medium die Oberfläche desselben so schief treffen, dass der Brechungswinkel größer als 90° sein müßte, gehen in ein weniger dichtes Medium nicht über, sondern werden vollständig in das dichtere Medium zurückgeworfen. Diese Erscheinung nennt man die totale Reflexion. Auf derselben beruhen die Luftspiegelungen, die sich teils auf dem Lande, in sehr ausgedehnten heißen Ebenen, teils auf dem Meere zeigen.

Antwort. Nimmt der Einfallswinkel von Null aus allmählich zu, so wird er sich einem Grenzwerte G nähern, welchem ein Brechungswinkel von 90° entspricht. Steigt aber der Einfallswinkel über diesen Grenzwert, d. h. trifft der Schallstrahl unter einem größeren Winkel auf die Grenzfläche eines Mediums, dessen Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die Schallwellen größer ist, so kann er durch diese Fläche nicht in das letztere Medium eindringen, und es findet dann eine totale Reflexion statt.

Frage 934. Betrachten wir nun Schallwellen, welche sich in der Luft gegen einen Wasserspiegel fortbewegen, und nehmen wir die Schallgeschwindigkeit in Luft zu 340 m und in Wasser zu 1435 m an, so ergibt sich welcher Wert für den Grenzwinkel G?

Erkl. 863.

1)
$$\log 340 = 2{,}53148$$
$$-\log 1435 = 3{,}15685$$
$$\log G = 9{,}37463$$
$$G = 13^0\ 42'.$$

2)
$$\log \sin 10^0 = 9{,}23967$$
$$+\log 1435 = 3{,}15685$$
$$12{,}39652$$
$$-\log 340 = 2{,}53148$$
$$\log \sin \beta = 9{,}86504$$
$$\beta = 47^0\ 8'.$$

3)
$$\log \sin 13^0 = 9{,}35209$$
$$+\ 3{,}15685$$
$$12{,}50894$$
$$-\ 2{,}53148$$
$$9{,}97746$$
$$\beta = 71^0\ 42'.$$

Antwort. Da nach Antwort 926
$$\sin \alpha : \sin \beta = c : c'$$
und
$$\sin 90^0 = 1$$
ist, so erhalten wir
$$\sin \alpha : \sin 90^0 = 340 : 1435$$
oder
$$\sin \alpha : 1 = 340 : 1435$$
oder
$$\sin G = c/c'$$
oder
$$\sin G = \frac{340}{1435}$$
oder
$$G = 13^0\ 42'$$
(siehe die nebenstehende Hilfsrechnung). Ist $\alpha = 10^0$, dann ist $\beta = 47^0\ 8'$; ist $\alpha = 13^0$, dann ist $\beta = 71^0\ 42'$.

Bildet also die Fortpflanzungsrichtung in der Luft einen kleineren Winkel mit dem Wasserspiegel als 76° 18', das Komplement von 13° 42', so wird der Schall so gut wie vollständig zurückgeworfen.

Frage 935. Eine solche totale Reflexion wird besonders oft an der Grenzfläche welcher Mittel vorkommen?

Erkl. 864. sin $G = 1/14$;
log. 1/14=8,85387—10, also $G = 4^{0}\ 6'$.

Chr. Doppler erklärte mittelst der totalen Reflexion des Schalles eine Erscheinung, welche sich bei der Ermittelung der Schallgeschwindigkeit im Wasser des Genfer Sees von Colladon und Sturm (1824) ereignete, nämlich, dass von einer gewissen Strecke an, der im Wasser erregte Schall in der Luft nicht mehr gehört wurde, wohl aber im Wasser. Von dieser Stelle an wurden also alle an die innere Seite der Wasseroberfläche gelangenden Schallstrahlen vermöge der totalen Reflexion nach innen zurückgeworfen, und zwar ganz so wie es die im vierten Gesetze gegebene Formel verlangt.

Antwort. Eine solche totale Reflexion wird oft an der gemeinsamen Grenzfläche zweier Mittel vorkommen, bei welchen der Unterschied in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles bedeutend ist. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Glas beinahe 14mal so groß ist wie in Luft, so beträgt der Grenzwinkel, bei welchem die Reflexion an der Glasfläche eine totale wird, etwa $4^{0}\ 6'$.

Frage 936. Was versteht man unter der Beugung des Schalles?

Erkl. 865. Da die Schallwellen durch einen ihnen entgegenstehenden Schirm teilweise zurückgehalten werden. so entsteht hinter dem Schirme gewissermaßen ein Schallschatten, d. h. ein Raum, in welchem der Schall nicht oder doch nur in sehr geringem Grade merkbar ist. Ein solcher Schatten tritt um so deutlicher hervor, je kleiner die Wellenlänge ist im Verhältnisse zur Fläche des Schirmes, also bei hohen Tönen deutlicher als bei tiefen und bei Lichtstrahlen viel deutlicher als bei Schallstrahlen. (Siehe Seite 54 und Seite 82 im ersten Bande unserer Akustik.)

Antwort. Die Beugung des Schalles ist die bekannte Erscheinung, dass man den Schall auch hinter festen Körpern hört, die zwischen dem Ohre und der Schallquelle sich befinden. In den meisten Fällen rührt dies nicht davon her, dass sich der Schall auch durch feste Körper fortpflanzt, sondern von einer Umbiegung der Schallstrahlen an den Grenzen der festen Körper. Die Schallwellen treffen nämlich auch die Luftmassen an dem Rande des festen Körpers und erzeugen hier Elementarwellen, die sich in der Luftmasse hinter dem Schirme zu einer fortschreitenden Welle vereinigen.

Frage 937. Wie läßt sich zeigen, dass der Schall durch einen freistehenden Schirm eine Beugung erleidet, so dass er hinter demselben zu hören ist und ganz

Antwort. Um dies zu zeigen, hängt man eine Scheibe aus Blei oder Kartonpapier von etwa 15 cm Durchmesser auf und bringt

besonders bei tiefen Tönen gut wahrgenommen werden kann, während bei hohen Tönen die Beugung eine Verstärkung des Schalles in bestimmten Punkten hinter dem Schirme verursachen kann?

Erkl. 866. Das merkwürdigste Beispiel dieser Beugung der Schallwellen ereignete sich in Erith nach der furchtbaren Explosion eines Pulvermagazins im Jahre 1864. Das Dorf Erith liegt einige Meilen vom Magazine entfernt, aber fast in allen Häusern waren die Fenster gesprungen, und zwar die der Explosionsquelle abgewandten Fenster ebenso wie die ihr zugekehrten. An der Kirche teilte sich die Schallwelle nach rechts und links und preßte alle in Blei gerahmten Fenster nach innen. Die Explosion einer mit Pulver beladenen Barke auf dem Regents Park Canal zerbrach Fenster auf der Hinterseite und infolge des unverbrauchten, von der Schallwelle mitgenommenen Pulvers war das zerstörte Torwärterhaus ringsum von einem schwarzen Kohlengürtel umschlossen. (Tyndall.)

in der Achse derselben in einer Entfernung von 20 bis 30 cm eine Taschenuhr an. An der andern Seite der Scheibe findet man dann auf der Achse leicht einen Punkt, wo die um den Rand sich beugenden Schallwellen mit gleichen Phasen eintreffen, so dass man mit Hilfe eines Schalltrichters von etwa 4 cm Weite das Ticken der Uhr verstärkt hört, während der Schall in allen außerhalb der Achse gelegenen Punkten schwächer wahrgenommen wird.

G. Die Aenderung der Tonhöhe durch Bewegung der Tonquelle.

Frage 938. Wie lautet der Doppler'sche Satz (oder das Doppler'sche Prinzip) und seine Begründung?

Erkl. 867. Den nebenstehenden Satz sprach zuerst Christian Doppler im Jahre 1842 aus, als er den periodischen Farbenwechsel der Doppelsterne dadurch zu erklären suchte, dass er annahm, die Geschwindigkeit dieser Sterne sei nicht verschwindend klein gegen die Schnelligkeit des Lichtes, und dass sich mit der schnellen Annäherung oder Entfernung der Doppelsterne an den Beobachter ihre Farbe (d. h. die Schwingungszahl des Aethers) ändere. Um nun für diese Ansicht durch ähn-

Antwort. Die Tonhöhe wird eine andere, wenn die Tonquelle oder der Beobachter sich schnell von oder gegeneinander bewegen.

Begründung: Nach Doppler gehen von der Tonquelle Stöße aus, die mit einer gewissen Geschwindigkeit fortgepflanzt, unser Ohr treffen. Wenn nun der Beobachter der Schallquelle entgegeneilt, so wird er in der Zeiteinheit einer Sekunde mehr Schallwellen auffangen, als wenn er dieselben ruhend empfängt, folglich wird der Ton für ihn er-

liche Erscheinungen eine Stütze zu finden, suchte Doppler auf dem Gebiete des Schalles nachzuweisen, dass sich für den Beobachter ein Ton erhöht oder vertieft, je nachdem die Schallquelle dem Ohre rasch genähert oder von demselben schnell entfernt wird und umgekehrt. Das so gewonnene Resultat übertrug er dann auf den Farbenwechsel einer rasch bewegten Lichtquelle.

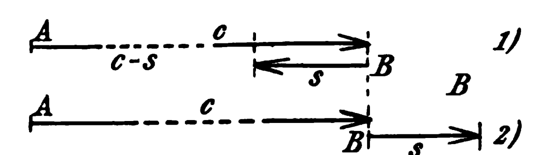
höht. Entfernt er sich rasch von der Schallquelle, so wird er aus entgegengesetzten Gründen den Ton tiefer vernehmen.

In ähnlicher Weise verhält es sich für das Ohr des Beobachters, je nachdem ihm die Tonquelle rasch genähert oder entfernt wird.

Frage 939. Auf welche Weise läßt sich die scheinbare oder subjektive Tonhöhe berechnen, für den Fall, dass die Tonquelle ruht und der Beobachter sich rasch gegen dieselbe oder von derselben bewegt?

Antwort. Ruhen anfangs der Beobachter B und die Schallquelle A (Fig. 484), so empfängt das Gehör des ersteren in jeder Sekunde n Schallwellen, vorausgesetzt, dass der Ton der Schallquelle sekundlich n Schwingungen vollzieht. Eilt aber der Beobachter dem schallenden Körper A mit einer Geschwindigkeit von s entgegen, d. h. legt derselbe pro Sekunde in der Richtung nach A hin den Weg s zurück, so erhält er auch noch jene Anzahl n_1 der Wellen, welche auf der von ihm beschriebenen Strecke s liegen. Nennen wir die Wellenlänge l, die Schallgeschwindigkeit c, so ist (siehe I. Bd. der Akustik) die Wellenlänge $l = c/n$ und auf der Strecke s liegen $n_1 = s/l$ Wellen, oder für l den vorigen Wert eingesetzt, $n_1 = ns/c$ Wellen. Es empfängt also das Ohr nicht nur die n Schwingungen des ursprünglichen Tones, sondern noch ns/c dazu; folglich ist die Schwingungszahl

Fig. 484.



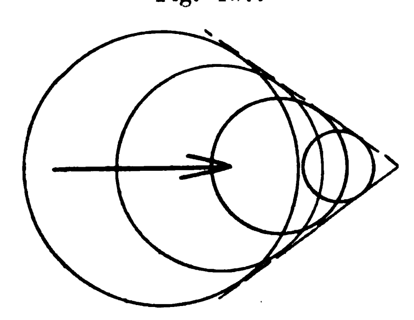
Erkl. 868. Das Doppler'sche Prinzip gilt für jede Art der Wellenbewegung. Breiten sich Wellenkreise gleichförmig über eine Wasserfläche aus, so dass stets eine bestimmte Anzahl Wellen in der Zeiteinheit bei einem stillliegenden Boote ankommen, so wird diese Anzahl zunehmen, wenn sich das Boot gegen die Wellen hin fortbewegt, und abnehmen, wenn die Bewegung des Bootes in der Fortpflanzungsrichtung der Wellen stattfindet.

Wirft man ein Stück Holz auf eine ruhende Wasserfläche, so bildet sich, in konzentrischen Kreisen fortschreitend, das bekannte transversale Wellensystem (Fig. 485). Bindet man jedoch das Holz an einen Faden, wirft es auf die Wasserfläche und zieht den Faden zu sich heran mit einer Geschwindigkeit, welche die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle im Wasser nicht übersteigt, so sieht man

deutlich, wie vor dem Holze die Wellenberge sich zusammenschieben, hinter demselben jedoch mehr voneinander sind als vorher (Fig. 486). Vor dem Holze wird die Wellenlänge verkürzt, die Schwingungszahl erhöht, umgekehrt hinter demselben, wo die Wellenlänge größer, also die Schwingungszahl kleiner wird. Das ist das Doppler'sche Prinzip. Zieht man das Holz mit größerer Geschwindigkeit als der der Fortpflanzung der Wasserwelle zu sich heran, so bildet sich durch Interferenz (Seite 49 und 58, I. Bd. der Akustik) eine keilförmige Streckwelle, die als Resultierende aller der Wellen, die das Holz beim ruckweisen Fortschreiten pro Bruchteil der Sekunde erzeugt, leicht zeichenbar ist. (Fig. 487.)

Beide Fälle kann man bei schwimmenden Schwänen oder Enten je nach der Schwimmgeschwindigkeit der Tiere gut beobachten. Den Fall der keilförmigen Bugwelle zeigt uns das Schiff.

Fig. 487.



Ein durch die Luft sausendes Projektil erzeugt in derselben Weise eine hyperbolische Streckwelle, deren tatsächliches Vorhandensein photographisch festgelegt ist.

$$N = n + ns/c$$

oder

$$N = n\ (1 + s/c).$$

Entfernt sich hingegen der Beobachter von der Schallquelle mit derselben Geschwindigkeit s, so ist aus denselben Gründen die scheinbare Schwingungszahl

$$N = n - ns/c$$

oder

$$N = n\ (1 - s/c),$$

mithin ist jetzt die subjektive Wahrnehmung des Tones tiefer.

Fig. 485.

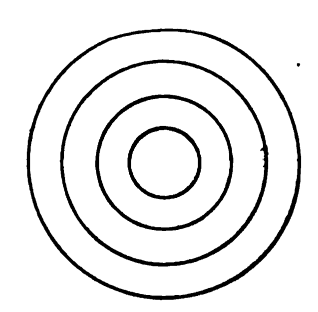
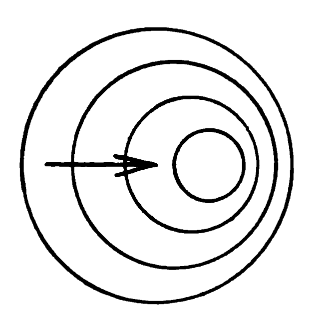


Fig. 486.



Frage 940. Auf welchem Wege läßt sich die scheinbare oder subjektive Tonhöhe berechnen, wenn der Beobachter ruht und die Schallquelle in Bewegung gegen denselben oder von demselben ist?

Antwort. In diesem Falle erfolgen die späteren Schwingungen von anderen Punkten der Bahn als die früheren; sie erreichen daher auch den ruhenden Beobachter früher oder später, je nach-

Erkl. 869. Es sei die Schallgeschwindigkeit $c = 340$ m, die Tonquelle A gebe einen Ton von 435 Schwingungen (wonach also die Wellenlänge l etwa 78 cm beträgt), und der Beobachter bewege sich mit $s = 20$ m Geschwindigkeit nach der Tonquelle A hin, so erhält derselbe pro Sekunde nicht allein die 435 Wellenstöße, sondern dazu noch so viele Wellen als die 78 cm Wellenlänge in der Geschwindigkeit s von 20 m enthalten ist, also rund 25. Der Beobachter hört also nicht mehr, wie im Zustande der Ruhe, den Kammerton a von 435 Schwingungen, sondern das nächst höhere b von 460 Schwingungen.

Entfernt sich dagegen der Beobachter mit derselben Geschwindigkeit von der Schallquelle, so hört er nicht mehr den Ton a^1, sondern das nächst tiefere gis von 410 = (435—25) Schwingungen. Dasselbe Resultat erhalten wir selbstverständlich, wenn wir die entsprechenden Zahlenwerte in die in Antwort 939 gegebenen Formeln einsetzen. Danach ist

$$N = 435\ (1 + 20/340) \text{ oder}$$

$$N = 435 \cdot 18/17 = 460 \text{ Schwingungen.}$$

Entfernt sich der Beobachter, dann ist

$$N = 435\ (1 - 1/17)$$

oder $$N = 435\ .\ 16/17$$

oder $$N = 410 \text{ Schwingungen.}$$

Bleibt der Beobachter stehen, und bewegt sich die Tonquelle nach ihm hin mit einer sekundlichen Geschwindigkeit von 20 m, so hört der Beobachter pro Sekunde

$$N = 435 \cdot \frac{340}{340-20} \text{ oder}$$

$$N = 435 \cdot 340/320$$

oder $$N = 435\ .\ 17/16$$

oder $$N = 462 \text{ Schwingungen.}$$

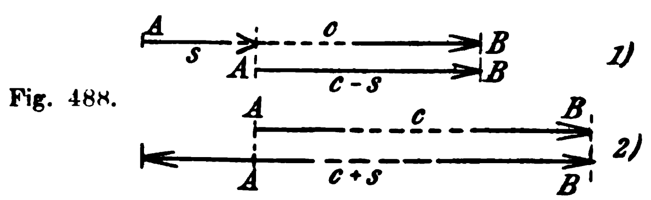


Fig. 488.

dem die Tonquelle sich gegen ihn oder von ihm bewegt. Heißt c die Geschwindigkeit der Schallfortpflanzung und n die Schwingungszahl des Tones, so liegen n Wellen auf der Strecke c, wenn das tönende Instrument und der Beobachter ruhen. Bewegt sich jedoch die Schallquelle A gegen den ruhenden Beobachter B mit der Geschwindigkeit s, so liegen die n Schallwellen nicht mehr auf der Strecke c, sondern schon auf jener $c—s$. Die Schwingungszahl N, welche der größeren Strecke c entspricht, ergibt sich daher aus der Gleichung

$$c : c - s = N : n$$

und hat den Wert

$$N = \frac{c\,n}{c - s}.$$

Da nun in dieser Formel die ursprüngliche Schwingungszahl n mit der größeren Zahl c multipliziert und mit der kleineren Zahl $(c—s)$ dividiert wird, so muß die scheinbare oder subjektive Schwingungszahl N größer, also der Ton dem Beobachter höher erscheinen als er es objektiv wirklich ist.

Entfernt sich die Tonquelle A von dem Beobachter B, so erhält s das umgekehrte Vorzeichen, und daher ist in diesem Falle

$$N = \frac{c\,n}{c + s},$$

d. h. kleiner als n, und mithin ist jetzt die scheinbare Tonhöhe tiefer.

Bewegt sich dagegen die Schallquelle mit 20 m Geschwindigkeit vom Beobachter, so hört der letztere pro Sekunde $N = 435 \,.\, 340/360$ oder $N = 435 \,.\, 17/18$ oder $N = 411$ Schwingungen.

Frage 941. Auf welche Weise fand eine Prüfung der Doppler-schen Theorie durch Versuche auf Eisenbahnen statt?

Antwort. Die Erhöhung oder Vertiefung des Tones einer rasch bewegten Schallquelle oder für den Fall, dass der Beobachter sich schnell bewegt, hat Buys-Ballot (1845) auf der belgischen Eisenbahn zwischen Utrecht und Maarsen in folgender Weise nachgewiesen: Man schickte eine rasch fahrende Lokomotive an drei Stationen vorüber, während man in letzteren oder auf der Lokomotive einen konstanten Ton blasen ließ, der von geübten Musikern beobachtet wurde. Immer erschien der ankommende Ton höher, der sich entfernende tiefer, und zwar (wenn die nötigen Korrektionen bezüglich des Baro-, Thermo- und Hygrometerstandes und der Stärke sowie auch der Richtung des Windes vorgenommen wurden) nahezu nach Dopplers Theorie.

In ähnlicher Weise hat M. Scott Russel (1850) in England die Eisenbahn zum erfahrungsmäßigen Nachweise des Doppler'schen Satzes mit Erfolg benützt.

Fährt die Lokomotive gegen die Façade eines Tunnels, so hört der Mitfahrende den von der Wand reflektierten Ton der Signalpfeife höher als den direkten. Fahren zwei Züge, sich begegnend, rasch an einander vorüber, so hört der Mitfahrende die Signalpfeife des anderen Zuges zuerst in höherer Tonlage, welche im Momente der Begegnung rasch in die tiefere übergeht.

Erkl. 870. Es bietet sich öfter Gelegenheit, diese Erscheinung zu beobachten: Fährt man auf einem Schlitten, wie man sie im Gebirge zum jähen Herabrutschen an Bergabhängen gebraucht, so kann man beobachten, dass der Ton einer Pfeife, die von einem Fußgänger geblasen wird, beim Heranfahren höher und beim Vorüberfahren tiefer wird. Dieselbe Bemerkung macht der Fußgänger, wenn der die Pfeife blasende Schlittenfahrer schnell an ihm vorüberfährt.

In ähnlicher Weise hörte Mach, wie der Ton einer an ihm mit nahezu konstanter Geschwindigkeit vorüberpfeifenden Spitzkugel sich vertiefte. Wer auf dem Fahrrade einem anderen Radfahrer begegnet, während dessen Signalklingel ertönt, der nimmt, selbst bei mäßiger Geschwindigkeit, im Augenblicke der Begegnung eine deutliche Tonerniedrigung wahr.

Auch die Klingel einer Lokomotive der Sekundärbahn vermag die Erscheinung auf verschiedene Weise hervorzurufen. Sitzt man im Zuge, so hört man die Schläge der Klingel in der wirklichen Tonhöhe. Fährt man aber auf 20 bis 50 m Entfernung an einem Hause vorbei, so dringt auch das Echo durch das geöffnete Fenster herein und man hört abwechselnd die direkten und die reflektierten Schläge der Klingel. Die Höhe beider Töne ist dieselbe, falls die reflektierende Wand parallel zur Bewegungsrichtung des Zuges ist; im andern Falle muß ein Tonunterschied auftreten. Bildet die Wand mit der positiven Bewegungsrichtung einen scharfen Winkel, so wird der reflektierte Ton tiefer; ist der Winkel stumpf, so muß dieser Ton erhöht gehört werden.

Frage 942. Welchen Apparat hat (1861) Mach erdacht zum Nachweise der geänderten Tonhöhe durch Bewegung?

Antwort. Mach hat für den Nachweis der Doppler'schen Theorie folgenden Apparat erdacht: Eine 2 m lange Stange *a b* (Fig. 489) ist der Länge nach mit einer ziemlich weiten Bohrung versehen. Die Stange ist um eine wagerechte Achse *r d* drehbar, welche ebenfalls auf der einen Seite eine mit dem Rohre *a b* kommunizierende Bohrung besitzt. Das eine Ende des Rohres *ab* trägt ein kleines Zungenpfeifchen von dem Tone a^1, so dass eigentlich das Rohr *a b* eine Zungenpfeife darstellt. Versetzt man nun die Pfeife *a b* durch die aus der Figur ersichtliche Vorrichtung in sehr rasche Rotation, so wird vermöge der sich entwickelnden Zentrifugalkraft (ähnlich wie bei den Zentrifugalventilatoren) Luft bei dem Zungenpfeifchen aus- und andere bei der Hohlachse eintreten, mithin Luft durch die ganze Pfeife getrieben. Infolge dessen beginnt diese zu tönen, und zwar vernimmt man den Ton schwebend, vermöge der steigenden Tonhöhe, wenn sich das Zungenpfeifchen dem Beobachter nähert, und vermöge der sinkenden Tonhöhe, wenn sich die Tonquelle von ihm entfernt. Das sehr deutliche Schweben des Tones entspricht also auch der Höhendifferenz des veränderlichen Tones. Bringt man hingegen das Ohr in die Verlängerung der hohlen Umdrehungsachse, so hört man den Ton der Pfeife konstant, also ohne Schwebungen, weil diesmal die rasch rotierende Tonquelle stets in gleichem Abstande vom Ohre bleibt. Dieser in seiner Höhe beständig bleibende Ton sticht scharf von jenem auf- und abschwebenden Tone ab, und wird selbst durch die von den Zimmer-

Fig. 489.



Erkl. 871. E. Grimsehl in Hamburg hat dem nebenerwähnten Versuche die folgende wesentlich einfachere Form gegeben. Man nimmt von einer kleinen Kindertrompete das Mundstück mit der Stimme (einem kleinen Labium) ab und befestigt es mittelst umgeschlungenen Bindfadens an dem einen Ende eines ½ bis 1 m langen Gummischlauches. In das andere Gummischlauchende steckt man ein kurzes Glasrohr. Nun nimmt man das letztere in den Mund und bläst das Labium durch den Schlauch an. Beim Herumschleudern des Schlauches um das in

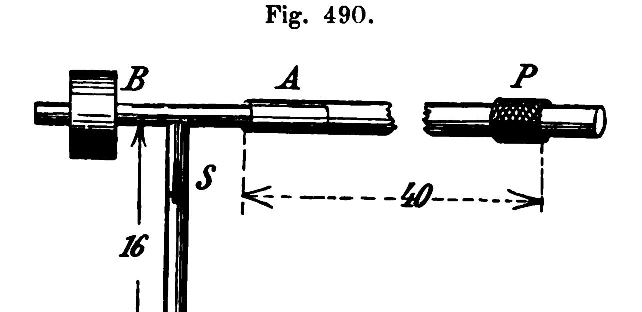
den Mund gesteckte Ende hört ein in der Ebene der Kreisschwingungen stehender Beobachter die Tonhöhenschwankungen sehr deutlich, während er einen gleichmäßigen Ton hört, wenn er sich in der Achse der Drehung befindet.

wänden zurückgeworfenen Schallwellen nicht gestört. (Pisko.) Die oberflächlich mit Hilfe des Ohres bestimmte Tondifferenz kam bei diesen Versuchen jener nach der Doppler'schen Theorie berechneten nahe.

Frage 943. Welche verbesserte Form hat D. van Gulik (in Apeldoorn, Holland) dem Mach-schen Apparate gegeben?

Antwort. Eine Messingröhre von 16 cm Länge und 9 mm Weite (Fig. 490), die vertikal auf die Schwungmaschine gestellt wird,

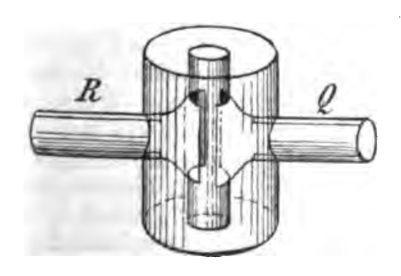
Fig. 490.



ist senkrecht an der Mitte eines andern Messingrohres $A\,B$ von 12 cm Länge angelötet. Um die eine Hälfte A ist eine dünnwandige, 40 cm lange, 11 mm weite Glasröhre gekittet, welche am Ende die Pfeife P (Stimmton a^1) trägt. Das Ende B ist geschlossen und trägt ein Bleigewicht, um die Zentrifugalkraft aufzuheben. Im Vertikalrohre ist 3 cm unter $A\,B$ ein Längsschlitz S ausgefeilt, 2 cm lang und 1,5 mm weit.

Erkl. 872. Fig. 492 zeigt den Apparat in der Form, in welcher derselbe von den mechanischen Präzisions-Werkstätten von Ferdinand Ernecke, Berlin SW. bezogen werden kann.

Fig. 491.

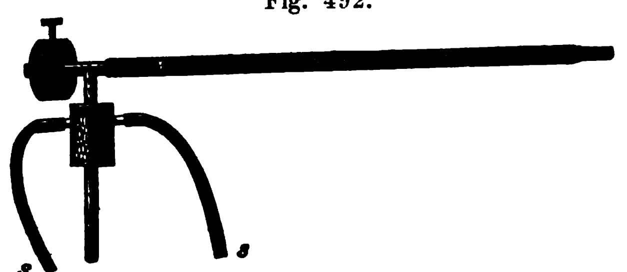


Weiter durchbohrt man einen großen Kork der Länge nach, so dass die Vertikalröhre sich dem Loche genau anschließt. Der Kork erhält weiter noch eine Querbohrung QR (Fig. 491), welche mit der Längenbohrung durch zwei Spalten oder Schlitze von 1,8 cm Höhe kommuniziert. Bei Q und R

Erkl. 873. Rollmann befestigte (1871) an einer Schwungmaschine eine lange Stange, die an ihrem äußeren Ende eine große Glaskugel mit einer angeschliffenen Oeffnung trug, welche durch einen tangentialen Luftstrom wie ein Brummkreisel angeblasen werden konnte. Bei der raschen Drehung blies dieselbe sich selbst an und erhöhte und erniedrigte ihren Ton bei jeder Umdrehung einmal, wenn der Beobachter in der Richtung der Stange stand.

sind kurze Glasröhrchen im Korke eingekittet, welche die zwei Gummischläuche vom Gebläsetische tragen, durch welche dem Apparate der notwendige Luftstrom zugeführt wird. Dieser Kork wird bei Schlitz S auf das Vertikalrohr gesteckt (Fig. 492), und nachdem man den Apparat auf die Rotationsmaschine gesetzt hat, wird der Kork in einem Stative festgeklemmt, damit er sich nicht mit der Röhre herumdrehen kann. Wird durch den Schlauch R Luft geblasen, so ertönt die Pfeife, so lange der drehende Schlitz S mit der Bohrung R kommuniziert. Bei jedem Umlaufe ist dieses während über 100° der Fall. Der Kork

Fig. 492.

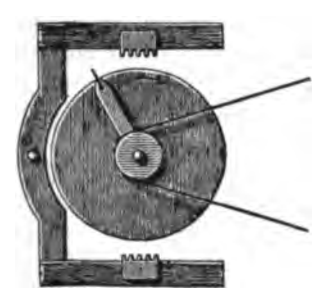


muß in solcher Stellung festgeklemmt sein, dass die Pfeife sich alsdann dem Beobachter nähert. Wird nachher Luft durch die Bohrung Q geblasen, so ertönt die Pfeife beim Entfernen vom Beobachter jedesmal während 100°. Bei schneller Drehung hört man also einen Ton, der höher oder tiefer ist, je nachdem man Luft durch den einen oder den andern der beiden Schläuche ss (Fig. 492) bläst. Eine einfache Rechnung lehrt, dass auf diese Weise eine Tondifferenz (gleichwie bei dem Rechnungsbeispiele in Erkl. 869 von gis_1 bis b_1) von einem ganzen Tone schon erreicht wird, wenn die Pfeife eine Geschwindigkeit von 20 m hat.

Frage 944. Schon vor Mach hatte es Fizeau (1848) unternommen, das Doppler'sche Prinzip durch welchen Versuch in seinem Laboratorium zu untersuchen?

Erkl. 874. Doppler machte eine interessante Anwendung von seinem Prinzipe zur Bestimmung der Geschwindigkeit, mit welcher sich die Fixsterne im Weltenraume in der Richtung zum Beobachter hinbewegen, bezüglich sich von ihm entfernen. Bei der Annäherung eines Sterns muß die Anzahl der Schwingungen der beobachteten Lichtsorte zunehmen, und die

Fig. 493.



Linien im Spektrum des Sterns müssen sich infolgedessen ein wenig gegen die violette Seite hin verschieben. Das Umgekehrte wird erfolgen, wenn der Stern sich von uns entfernt. So fand Huggins, dass die Stellung der F-Linie im Spektrum (siehe Lehrbuch der Optik) des Sirius sich nicht mit der bekannten Stellung dieser Linie im Wasserstoff- oder im Sonnenspektrum deckte und berechnete aus der Größe der Verschiebung, dass der Fixstern sich mit einer Geschwindigkeit von 48 km von uns entfernt.

Antwort. Fizeau konstruierte zu diesem Zwecke ein Instrument, gewissermaßen eine Umkehrung des Savart'schen Rades (Seite 120 I. Bd. der Akustik) bei welchem das Kartenblatt an dem rotierenden Rade sitzt, während die Zähne an der Innenseite eines Kreisbogens befestigt sind, der in horizontaler Richtung über der Außenseite des Rades angebracht ist. Bei einer gewissen Umdrehungsgeschwindigkeit hört der Beobachter hinter dem Apparate z. B. *c*, während er *e* hört, wenn er vor dem Apparate steht, und in den Zwischenstellungen alle zwischen diesen beiden Noten liegenden Töne. Um den Versuch noch wirkungsvoller zu machen, bringt man zwei gleichgezähnte Bogen an, den einen oberhalb und den andern unterhalb des Rades. Da die rotierende Bewegung für die beiden Bögen den entgegengesetzten Sinn hat, so nimmt der Beobachter nacheinander beide Töne wahr, ohne seinen Platz wechseln zu müssen (Violle).

Frage 945. Gehen wir nun zu den indirekten Beweisen von Dopplers Prinzip über, so haben wir zunächst den König'schen Nachweis mittelst vermehrter oder verminder-

Antwort. Man nimmt zwei kräftig tönende Stimmgabeln von gleicher Höhe (z. B. vom Tone *c''*) und stellt sie zur Verstärkung des Tones auf Resonanzkästen.

ter Schwebungen zu erwähnen. In welcher einfachen und überzeugenden Weise läßt sich dieser Nachweis führen?

Vertieft man nun den Ton der einen Gabel ein wenig dadurch, dass man an den Enden der Schenkel etwas Wachs befestigt, so hört man bei gleichzeitigem Schwingen beider Gabeln die später zu erörternden Schwebungen, deren Anzahl in der Sekunde mit dem Unterschiede in der Tonhöhe der Gabeln zunimmt. Angenommen, beide Gabeln geben in der Sekunde vier solcher Stöße miteinander, wenn beide Tonquellen und der Beobachter ruhen. Nähert man nun die etwas tiefer tönende Gabel um etwa 60 cm dem Ohre, so hört dieses (da 60 cm ungefähr gleich der Wellenlänge von c'' ist) jetzt nur drei Stöße in der Sekunde, was beweist, dass das Ohr nunmehr eine Doppelschwingung mehr in der Sekunde von ihr erhalten hat, dass also ihr Ton subjektiv um eine doppelte Schwingung für die gewählte Zeiteinheit vermehrt wurde.

Nähert man die etwas höher gestimmte Gabel um etwa 60 cm dem Ohre, so empfängt das Ohr fünf Stöße statt vier. In solcher Weise kann man durch Nähern und Entfernen der Gabeln die Stöße um einen vermehren und vermindern (wobei man ein Sekundenpendel beobachtet).

Erkl. 875. Alfred Mayer hat (1872) zahlreiche Versuche mit zwei Stimmgabeln angestellt, durch welche alle Folgerungen des Prinzips bestätigt wurden. Werden zwei solche Gabeln von gleicher Tonhöhe in größerer Entfernung voneinander aufgestellt, so kann man die eine dadurch in Schwingungen versetzen, das man die andere mit einem Violinbogen anstreicht. Man macht den Unterschied in der Tonhöhe bei beiden Gabeln gerade groß genug, dass die eine Gabel die andere nicht mehr in Mitschwingungen zu versetzen vermag. Streicht man nun die Gabel vom höheren Tone an, so wird die andere erst dann in Mitschwingung geraten, wenn man sich von ihr mit der angestrichenen Gabel soweit entfernt, dass in der Sekunde bei der stillstehenden Gabel eine Anzahl Wellen eintrifft, welche genau der Schwingungszahl dieser letzteren Gabel gleichkommt.

Frage 946. In welcher Weise läßt sich nach Weinhold's „physikalischen Demonstrationen'' (1887) mittelst einer sehr hohen Stimmgabel das Dopplersche Prinzip einer größeren Anzahl von Menschen demonstrieren?

Antwort. Man benutzt zu diesem Zwecke eine sehr hohe und sehr kräftige Stimmgabel, welche wegen ihrer breiten Seitenflächen (Fig. 494) einen sehr starken Ton gibt, wenn man sie mit einem gut geharzten Bassbogen kräftig streicht. Bewegt man dann, nahe an einer Wand des Zimmers stehend, die tönende Gabel senkrecht gegen die Wand hin und her, so hört man sehr deutlich vernehmbare Schwebungen, weil der von der Gabel direkt zum Ohre

Erkl. 876. Vogel hat (1876) die Versuche von Buys-Ballot wieder aufgenommen und auf der Eisenbahn von Köln nach Minden eine Reihe von sehr

sorgfältigen Beobachtungen angestellt, die die Richtigkeit der Dopplerschen Formel bestätigen.

Schüngel (1873) und Quesneville (1879) haben nach der König'schen Methode der Schwebungen Messungen vorgenommen, die gleichfalls vollständig die Doppler'schen Formeln bestätigten.

Erkl. 877. Die Tonschwankungen, welche wir häufig von den uns umschwirrenden Insekten zu hören bekommen, dürften ihren Grund zum Teil in der raschen Bewegung der Tonquelle gegen unser Ohr oder von demselben haben, vorausgesetzt, dass die Tiere ihre Fluggeschwindigkeit nicht ändern. Fliegt ein Insekt rasch an unserm Ohr vorbei, so wird der Ton schwächer und zugleich tiefer.

gelangende und der von der Wand reflektierte Ton immer die entgegengesetzte Veränderung ihrer Höhe erleiden. Bewegt man die Gabel mit einer Geschwindigkeit von 1 m pro Sekunde nach der Wand zu, so wird für einen Beobachter, der sich in der Lotlinie

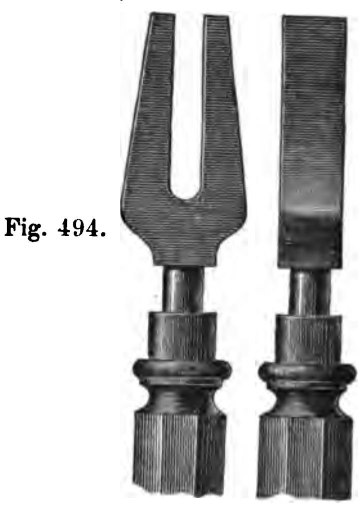


Fig. 494.

von der Gabel auf die Wand (jenseits von Gabel und Wand) befindet, der direkte Ton um 1/340 der Schwingungszahl vertieft und der reflektierte um 1/340 erhöht; so dass, wenn die wahre Schwingungszahl der Gabel z. B. 2064 ist, die scheinbare Schwingungszahl $2064 . 339/340 = 2058$ und $2064 \cdot 341/340 = 2070$ sein wird; der betreffende Beobachter hört also in der Sekunde 2070—2058 oder 12 Schwebungen.

H. Durch Schallwellen hervorgerufenes Mitschwingen elastischer Körper, oder das Mittönen und die Resonanz.

a) Allgemeines.

Frage 947. Aus welchen Erscheinungen des alltäglichen Lebens geht hervor, dass jedesmal, wenn ein Körper schwingt, andere in seiner Nähe befindliche Körper

Antwort. Es ist vielfach beobachtet worden, dass beim Läuten großer Glocken in der Nähe be-

gleichfalls in Schwingungen geraten, vorausgesetzt, dass dieselben elastisch, d. h. an sich selbst schon fähig sind, als Schallquellen zu dienen?

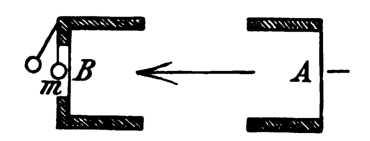
Erkl. 878. Körper, welche so beschaffen sind, dass sie eine Schallerregung nicht ermöglichen, sind auch zur Fortleitung des Schalles nicht geeignet, weshalb auch Wolle, weiche Gewebe, Talg, Kautschuk, Schwämme, Sägemehl u. dergl. zur Schallfortleitung ungeeignet sind und auch nicht wie die elastischen Körper durch an sie stoßende Schallwellen in Mitschwingungen versetzt werden können.

Singt man in einem Zimmer mit starker Stimme, so tönt bald eine Ofenplatte, bald eine Fensterscheibe, ein Hohlglas, eine gespannte Membran oder eine Saite mit. Hält man Röhren gegen das Ohr, so hört man in denselben, durch das gewöhnliche Tagesgeräusch hervorgerufen, einen schwachen Ton, welcher der Länge der in ihnen enthaltenen Luftsäule zukommt.

findliche Brückenpfeiler in Bebungen geraten, dass durch das Getöse des rollenden Donners ein Zittern der Türen und ein Klirren der Fenster hervorgerufen wird, und beim Tönen der tiefsten Pfeifen großer Orgeln erzittern die verschiedensten festen Körper, sogar die massiven Mauern in den Kirchen. Vor allen Dingen werden in gewölbten Räumen eingeschlossene Luftmassen leicht in mittelbare Schwingungen versetzt, woraus sich das summende Getöse, eine Art von Brausen, in manchen Muscheln erklärt, welches man wahrnimmt, wenn man ihre Oeffnung an das Ohr hält.

Frage 948. Durch welche einfachen Versuche läßt sich nachweisen, dass es wirklich die Luftschwingungen sind, durch welche feste Körper in Vibrationen versetzt werden?

Fig. 495.



Antwort. 1) Man nimmt zwei gleiche Holzkästen ohne Deckel. Bei dem einen *A* (Fig. 495) wird der Boden durch ein Stück gute feste Pappe ersetzt; beim andern *B* hat der Boden einen Ausschnitt, über welchen eine Membran gezogen ist. Ein leichtes Pendelchen *m* wird so angehängt, dass es die Membran eben berührt. Stellt man die Holzkästen mit den Oeffnungen einander gegenüber und gibt dem Pappboden einen Schlag, so wird das Pendelchen heftig abgestoßen. Das Aufschlagen geschieht zweckmäßig mit einem kleinen hölzernen Hammer, in den ein Korkstück eingesetzt ist. Stellt man zwischen den beiden Kästen eine brennende Kerze auf, so wird

deren Flamme erschüttert, aber nicht ausgelöscht; also eine Massenverschiebung der Luft findet hier nicht statt. (Schallversuche von N. S. Drenteln in St. Petersburg. Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht, VII, 272.)

2) Wenn man eine Membran von elastischem Gummi oder besser eine Tierblase oder ein Blatt Papier über einem Ringe oder hohlen Zylinder ausspannt, mit Sand bestreut und über demselben einen etwas starken Ton mittelst eines Blasinstruments erzeugt, so gewahrt man nicht bloß das Hüpfen des Sandes, sondern es kommt auch eine sehr kenntliche Klangfigur zum Vorschein. Am besten gelingt dieser Versuch, wenn man den Ton mit dem bloßen Rohre eines Fagotts oder einer Klarinette dicht über der Membran erzeugt. Dass das Hüpfen des Sandes nicht durch den Luftstrom des tönenden Werkzeugs verursacht wird, läßt sich zeigen, wenn man dessen Oeffnung nicht über der Membran selbst, sondern nur neben dem hohlen Zylinder münden läßt, über welchem die Membran ausgespannt ist.

Erkl. 879. Savart hat durch genauere Untersuchung aufgefunden, dass solche Schwingungen in einem zweiten Körper durch die dazwischenliegende Luft am leichtesten dann erzeugt werden, wenn die Schwingungszahl des einen 2-, 3-, 4-, 5mal so groß ist als die des andern. Die erzeugten Figuren sind den Chladnischen vollkommen ähnlich. Dabei ist es gleichgültig, ob die in der Luft fortschreitenden Wellen, die dann feste Körper in mittelbare Schwingungen versetzen, ursprünglich in der Luft, wie beim Donner, oder durch die Vibrationen fester Körper erzeugt worden sind.

Frage 949. Bei den vorerwähnten Versuchen und Erscheinungen wird der Schall (oder Ton) zu dem mitschwingenden Körper durch die Luft übertragen. Durch welchen Versuch läßt sich aber beweisen, dass die Tonübertragung auch durch flüssige Medien stattfindet?

Antwort. Auf das Klangkästchen einer Stimmgabel wird ein

Fig. 496.



Glas mit Quecksilber gestellt; darauf streicht man die von dem Kasten genommene Stimmgabel so schwach an, dass man ihre Schwingungen nicht hören kann; berührt man dann mit der Stimmgabel das Quecksilber, so ist der Ton sofort zu hören. Die Schwingungen der Stimmgabel pflanzen sich also nach der inneren Luftsäule durch das Quecksilber, das Glas und das Holz des Kastens fort.

Frage 950. Die Uebertragung der Schwingungen durch feste Körper, deren einer mit einem andern bereits schwingenden in genauer Verbindung steht, ist seit 1819 durch Felix Savart durch eine Reihe interessanter Versuche nachgewiesen worden. Durch welchen Versuch zeigte derselbe, dass sogar Körper von sehr geringer Elastizität durch die Vibrationen eines Tonerregers in Mitschwingungen versetzt werden können?

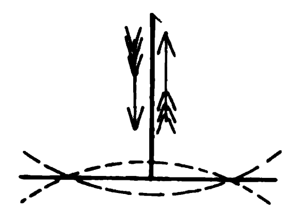
Erkl. 880. Savart verfertigte sich ferner zwei ganz gleiche Scheiben von der nämlichen Holzart und befestigte sie in ihren Mitten an den beiden Enden eines Stabes senkrecht zu ihren Ebenen. Hält man eine solche Vorrichtung so, dass die Scheiben horizontal liegen, und bestreut sie mit trocknem feinen Sande, so erzeugt sich, wenn man eine dieser Scheiben durch Streichen mit einem Violinbogen in transversale Schwingungen versetzt, durch den Stab auch in der andern Scheibe dieselbe Schwingungsart, da der aufgestreute Sand Knotenlinien verrät, welche denen der unmittelbar erschütterten Scheibe entsprechen. Die Transversalschwingungen dieser Scheibe geschehen in der Längsrichtung des auf ihr senkrechten Stabes, daher wird dieser von der Scheibe aus in Längs-

Antwort. Savart spannte eine etwas starke Violinsaite auf ein dickes Brett über einen gewöhnlichen Geigensteg, dessen Füße jedoch nicht auf dem Brette, sondern auf einer Bleiplatte ruhten, welche selbst unter diesen Füßen durch zwei Korkstücke unterstützt war, und erhielt dann beim Streichen der Saite auf der Bleischeibe Klangfiguren. Gab die Saite einen veränderten Ton, so kam auch eine andere Figur zum Vorschein. Hieraus folgt unmittelbar, dass auch der Steg, die Unterlagen der Platte und das Brett gleichzeitig mit der Saite schwingen, und dass die Höhe des Tones durch die Schwingungszahl der Saite, die Klangfarbe des Tones aber durch die Summe der Schwingungen aller mit ihr verbundenen Teile bedingt wird.

schwingungen versetzt, die bezüglich der untern Scheibe in der Richtung von deren Dicke stattfinden und deshalb die Teilchen derselben in transversale Schwingungen versetzen müssen. Sind mehrere solcher Scheiben durch einen vertikalen Stab miteinander verbunden, so zeigen sie alle die nämliche Figur, wenn eine derselben am Rande gestrichen wird.

Frage 951. Durch welchen Versuch zeigte Le Blanc bei der Prüfung der vorerwähnten Erscheinungen, dass direkte longitudinale Schwingungen indirekte transversale Schwingungen hervorrufen können?

Fig. 497.



Antwort. Le Blanc zeigte, dass eine Glasröhre, vertikal auf eine Scheibe gekittet und in longitudinale Schwingungen versetzt, auf der Scheibe Figuren erzeugt, welche eben so rein und bestimmt sind, als diejenigen, die unmittelbar durch das Streichen ihres Randes hervorgebracht werden. In welcher Weise durch die longitudinalen Schwingungen des vertikalen Stabes die transversalen Schwingungen der horizontalen Platte bedingt werden, das ist in nebenstehender Fig. 497 dargestellt. Dasselbe Verfahren ist auch bei einer Membran anwendbar.

Frage 952. Savart hat diese Untersuchungen noch weiter ausgedehnt, und welches allgemeine Gesetz gefunden?

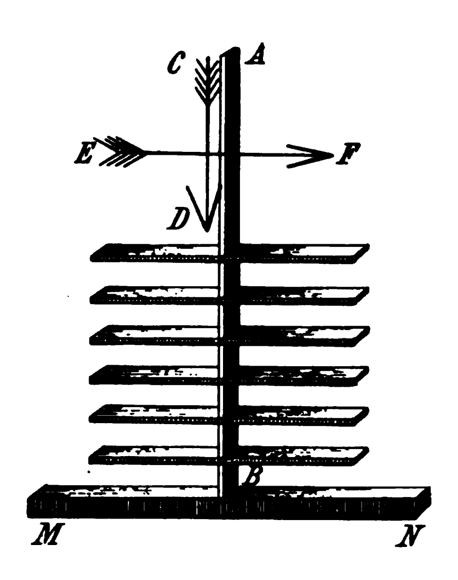
Antwort. Wenn verbundene feste Körper aufeinander lotrecht stehen, so erzeugen die longitudinalen Schwingungen des einen transversale Schwingungen im andern Körper und umgekehrt.

Frage 953. Durch welche verschiedenen Apparate läßt sich dieses Gesetz anschaulich machen?

Antwort. Von den verschiedenartigen tönenden Körpern, die sich auf mannigfaltige Weise zur Erzeugung gleichzeitig bedingter Wellen verbinden lassen, sind längliche Scheiben am meisten ge-

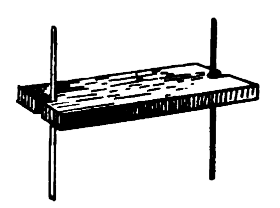
Erkl. 881. Le Blanc kittete eine Röhre oder einen schmalen Glasstreifen fast horizontal auf den Rand eines mit seinem Fuße befestigten Weinglases, rieb das eine Ende desselben mit einem wollenen Läppchen und erhielt den Ton des Glases sehr wohlklingend, auch tiefer, wenn in dasselbe Wasser gegossen

Fig. 498.



war. Dasselbe Resultat ergibt sich, wenn man eine lange und dünne Glasröhre lotrecht auf die Mitte einer beliebig gestalteten Scheibe von etwa 10 cm Durchmesser aufkittet und die Röhre entweder durch Reiben mit einem

Fig. 499.



nassen Lappen oder durch Querstriche mit einem Violinbogen in longitudinale oder transversale Schwingungen versetzt, indem dann die Scheibe jederzeit eignet und daher auch von Savart am vollständigsten untersucht worden, insbesondere um den Uebergang der longitudinalen Schwingungen in transversale und umgekehrt aufzufinden.

1. Fig. 498 zeigt ein System von sechs Holzstreifen, 30 bis 40 cm lang und 3 bis 4 cm breit, die mittelst des längeren Streifens *A B* auf einem Brett *M N* befestigt sind. Wird nun das obere Ende des Streifens *A B* durch Reiben mit beharzten Fingern in der Richtung des Pfeiles *C D* in longitudinale Schwingungen versetzt, so geraten die sämtlichen horizontalen Stäbe in transversale Schwingungen; streicht man dagegen das obere Ende des Vertikalstabes *A B* mit einem gut beharzten Violinbogen in der Richtung des Pfeiles *E F*, also parallel zu den Stäben an, so schwingen diese longitudinal. Kurz, die Bahnen aller Teilchen des ganzen schwingenden Systems haben eine parallele Richtung, wie aus der Bewegung des Sandes zu erkennen ist, welcher vor Beginn des Versuchs auf die horizontalen Streifen gestreut wird.

2. Die Art wie sich die Schallschwingungen einer vertikalen Saite auf mitschwingende horizontale Flächen übertragen, zeigt der folgende Versuch: Wird ein dünnes Brett in horizontaler Lage zwischen zwei vertikalen Saiten festgeklemmt (Fig. 499) und dasselbe etwas mit Sand bestreut, so ordnet sich letzterer, sobald wir eine der Saiten mit dem Violinbogen anstreichen, zu Linien, die, je nach der Richtung, in welcher wir den Strich ausführen, eine andere Figur zeigen. Streichen wir die Saite in der Längsrichtung des

die entgegengesetzten Schwingungen durch die Figuren des aufgestreuten Sandes kenntlich macht. (Vergleiche hiermit Seite 115 des II. Bandes der Akustik.)

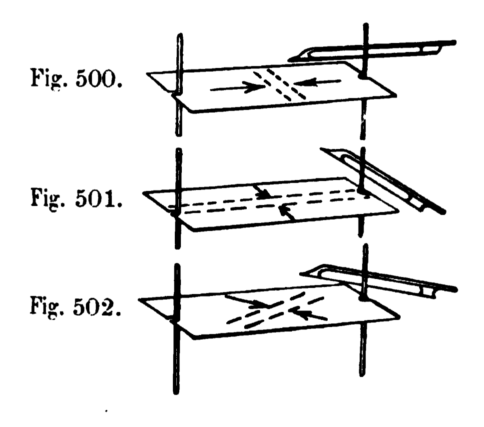


Fig. 500.

Fig. 501.

Fig. 502.

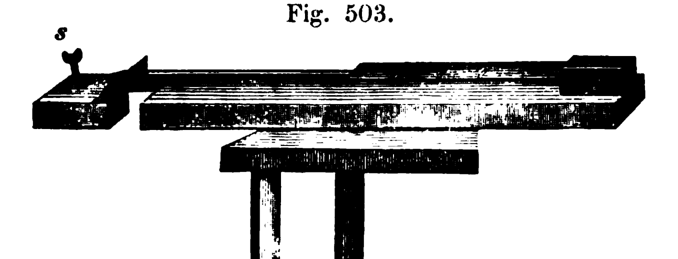
Brettchens (Fig. 500), so schwingt auch das Brett in der Längsrichtung, und der Sand bildet, senkrecht zu letzterer, Querlinien. Wird die Saite rechtwinklig zur Längsrichtung des Brettchens gestrichen (Fig. 501) so wird letzteres in Querschwingungen versetzt und der Sand sammelt sich längs desselben in einer Mittellinie. Führen wir aber den Bogen in einer Richtung, die zu den vorgenannten einen Winkel bildet, so ordnet sich die Sandlinie ebenfalls schief (Fig. 502). Zugleich zeigt dieser Versuch;

a) dass sich bei der Uebertragung von Vibrationen Längs- in Querschwingungen, und umgekehrt umsetzen lassen, und

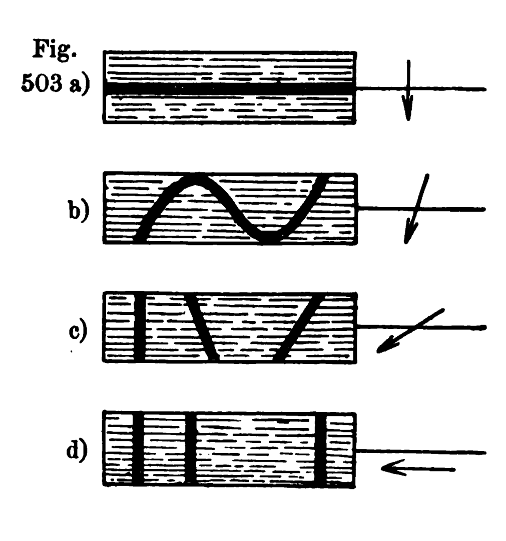
b) dass die Bogenführung auf das mehr oder weniger volle Mitschwingen der Resonanzflächen der Saiteninstrumente, und demnach auf die Schönheit und Fülle des Klanges von entschiedenem Einflusse ist.

3. Der Versuch kann auch in der Art ausgeführt werden, dass die Saite mit dem Holzstreifchen in ein und derselben Ebene liegt. Ein feiner Streifen Holz wird an seinem einen Ende an einem auf einem Boden aufgesetzten Holzstücke befestigt (Fig. 503), während an seinem andern Ende eine

Fig. 503.

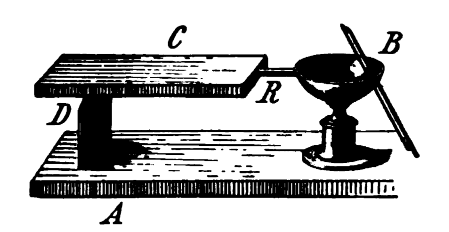


Saite befestigt ist, die bei *s* durch einen Schlüssel mehr oder weniger gespannt werden kann.



Streicht man nun die Saite mit einem Violinbogen unter verschiedenen Neigungen gegen die Oberfläche des Streifens oder Holzplättchens, so gerät auch das letztere in Schwingungen, deren Natur aus den Knotenlinien, welche aufgestreuter Sand bildet, erkannt werden kann. Streicht man die Saite senkrecht zur Ebene des Streifens, so gerät der Streifen in transversale Schwingungen, wie man aus der hüpfenden Bewegung des Sandes ersieht. Streicht man aber die Saite in einer mit der Ebene des Streifens parallelen Richtung (Fig. 503a bis d), so schwingen die Teilchen des Streifens in der Ebene desselben hin und her, und der Sand erhält keine hüpfende, sondern nur eine gleitende Bewegung.

Fig. 504.



4. Demselben Zwecke kann der folgende Apparat dienen: Auf einem dicken Brette *A* ist am einen Ende ein Becher (oder eine sog. Savart'sche Glocke) *B* festgekittet. Auf dem Rande desselben wird mittelst der Glasröhre *R* (Fig. 504) der schmale Glasstreifen C festgekittet, welcher mit dem andern Ende auf dem beweglichen Stege *D* ruht; streicht man den Becher der Verbindungsstelle gegenüber mit einem Bogen, so versetzt er durch seine Transversalschwingungen den Streifen in longitudinale, die durch aufgestreuten Sand sichtbar werden und dadurch an Interesse gewinnen, dass man durch eingegossenes Wasser den Ton des Bechers willkürlich tiefer machen kann.

Frage 954. Alle die vorerwähnten Apparate sind geeignet, das Auftreten erzwungener Schwingungen zu demonstrieren, aber zur Erläuterung dieser erzwungenen periodischen Bewe-

Antwort. Ein einfaches Beispiel einer unter dem Einflusse einer äußeren periodischen Kraft stehenden Schwingungsbewegung

gungen bedient man sich anderer Mittel, durch welche die Entstehung der sekundären Schwingungen unter dem Einfluße primärer Schwingungen so recht augenscheinlich gemacht wird. Welcher Apparat bildet das einfachste Beispiel dieser Art?

Erkl. 882. Damit die Kraft, welche die Schwingungsbewegung zu einer erzwungenen gestaltet, sich wirklich harmonisch ändert, ersetzt Rayleigh die Bewegung der Hand durch die Bewegung einer sehr schweren Pendelkugel B, welche kleine Schwingungen ausführt; an der Kugel B wird ein leichtes Pendel $A\ C$ befestigt (Fig .505). Wegen der verhältnismäßig großen

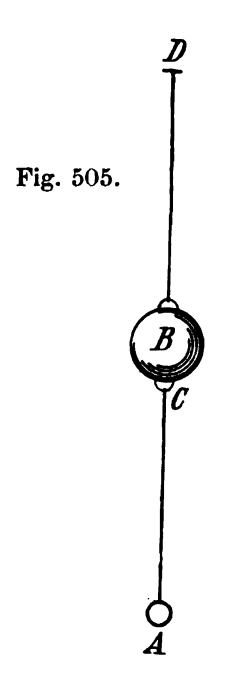


Fig. 505.

Masse der Pendelkugel B kann die Schwingung des Pendels $B\ D$ als unabhängig von der Bewegung des leichten Pendels angesehen werden. Der Aufhängepunkt C führt hier, wie beim nebenstehenden Beispiele die Hand, nahezu eine freie Bewegung aus, und

liefert (nach v. Helmholtz) ein gewöhnliches Pendel, dessen Aufhängepunkt man mit der Hand faßt, und dessen schweren Körper man in schwache Schwingungen versetzt. Man kann dann die Schwingungsbewegung dauernd unterhalten und dieselbe allmählich vergrößern, wenn man jedesmal, wo das Pendel seine größte Abweichung von der Senkrechten erreicht hat, eine ganz kleine Verschiebung der Hand nach der entgegengesetzten Seite macht. Also wenn das Pendel am meisten nach rechts gegangen ist, bewege man die Hand ein wenig nach links, wenn das Pendel links steht, bewege man sie ein wenig nach rechts.

Die Erklärung des Verfahrens ist folgende: Ist das obere Ende des Pendels an einem Nagel befestigt, so fährt das Pendel, einmal angestoßen, in seinen Schwingungen lange Zeit fort, und deren Größe vermindert sich nur sehr langsam. Befindet sich nun der angehängte Pendelkörper in der äußersten Abweichung nach rechts, und verrücken wir die Hand nach links, so machen wir den Winkel zwischen dem Faden und der Vertikallinie größer; würden wir das obere Ende des Fadens in entgegengesetzter Richtung bewegen, so würden wir die Schwingungsweite verkleinern.

Ganz dasselbe, was wir hier für die Schwingungen größerer Dauer kennen gelernt haben, gilt auch für die Schwingungen von so kurzer Dauer wie die der Tonschwingungen. Jeder elastische Körper kann bei geeigneter Befestigung zum Mitschwingen gebracht werden, wenn ihm eine periodische Erschütterung von kleinen Wegen mitgeteilt wird, deren Periode der Schwingungsdauer seines eignen Tones entspricht.

diese ist hier eine einfach schwingende oder harmonische. Sind beide Schwingungszeiten einander gleich, so gerät das untere Pendel in starke Schwingung, wenn auch die Bewegung des schweren Pendels äußerst klein ist. Hierbei ist dann die Phasendifferenz sehr nahe $1/4$ der Periode; um diesen Betrag ist die Bewegung des oberen Pendels der des andern voraus.

Sind die Massen beider Pendel weniger voneinander verschieden, so kann man ganz deutlich wahrnehmen, dass auch das obere Pendel unter der Einwirkung des unteren steht und eine erzwungene Schwingungsbewegung ausführt. Sind nun die Perioden beider Pendel fast gleich, so zeigt sich ein periodischer Wechsel in der Größe der Schwingungsweiten.

Frage 955. Zur Erläuterung des Resonanzprinzips hat van Schaik in Rotterdam einen Apparat konstruiert, der die Mitschwingung sehr deutlich zeigt, und bei welchem sich die Periode der die Schwingung erregenden Kraft gleichmäßig ändert. Wie ist dieser Apparat eingerichtet?

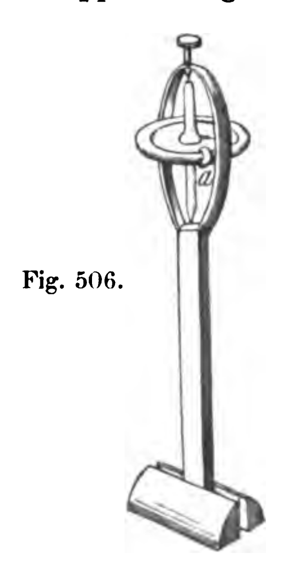


Fig. 506.

Antwort. Ein gyroskopischer Kreisel (siehe Lehrbuch der Dynamik, Seite 539) wird an das obere Ende einer stählernen Feder gut festgelötet, so dass seine Achse in der Verlängerung der Feder liegt. (Fig. 506.) Das untere Ende wird durch einen stark zugedrehten Schraubstock festgehalten. Das System kann durch die Biegung der Feder in Schwingungen versetzt werden, welche, wenn sie in der Breitenrichtung des Stahlstreifens erfolgen, wegen der größeren Biegungselastizität eine kürzere Dauer haben als die darauf senkrechten Schwingungen in der Richtung der kleinsten Elastizität.

Der Kreisel wird an seinem Umfange mit einer kleinen Bleimasse *a* belastet, so dass seine Achse in dynamischem Sinne nicht mehr frei ist. Man versetzt ihn alsdann in eine schnelle Drehung. Hierbei wirkt auf die einseitig

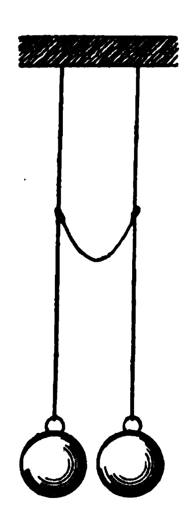
Erkl. 883. Die zu nebenstehendem Versuche benutzte Feder darf nicht zu kurz und zu schlaff genommen werden, da sonst die Entstehung des gyroskopischen Kräftepaares die Erscheinung unnötigerweise komplizieren würde. Die Dimensionen waren z. B. bei Ausführung eines Versuchs freie Federlänge 26 cm, Breite der Feder am unteren Ende 7 mm, am oberen Ende 6 mm, Dicke unten 3 mm, oben 2 mm. Auch ein federnder Holzstab, oder das Stück einer Klinge eignet sich gut zu dem beschriebenen Versuche. (Siehe Zeitschrift für den physkialischen und chemischen Unterricht, VII. Jahrg. S. 181 und Van Schaik, „Wellenlehre und Schall" Seite 39).

Erkl. 884. Es ist bekannt, dass Maschinenteile mit nicht freien Achsen, bei denen also die Zentrifugalkräfte bezw. Kräftepaare (Siehe Lehrbuch der Statik fester Körper, Seite 128) nicht vollkommen aufgehoben sind, bei der Rotation störende Schwingungen und Stöße verursachen. Der nebenstehende Versuch zeigt, unter welchen Umständen derartige Störungen ganz besonders heftig auftreten können.

belastete Achse eine Zentrifugalkraft ein, deren Richtung sich zugleich mit dem Kreisel umdreht, so dass das ganze System fast unmerkliche Zitterungen zeigt. Sobald nun die Geschwindigkeit des Kreisels soweit abgenommen hat, dass seine Periode der der Breitevibrationen der Feder nahekommt, gerät diese in heftige Schwingungen, welche rasch abnehmen, wenn der Unterschied zwischen beiden Perioden zu groß wird, so dass das System wieder zur Ruhe kommt. Später aber wird die Periode des Kreisels den langsamsten Schwingungen der Feder gleich, wodurch diese abermals in Schwingungen von großer Amplitude versetzt wird, welche ebenso wie die vorigen weit hin gesehen werden können.

Frage 956. Zu den Resonanzerscheinungen gehört auch die gegenseitige Einwirkung zweier gleichen Pendel, die an den Enden ein und derselben Latte aufgehangen sind, durch welche dann die geringe Bewegung des Aufhängepunktes des einen Pendels auf das andere übertragen wird. In welcher Weise ist dieser Versuch von E. Grimsehl in Cuxhaven (siehe Zeitschrift für den physikal. und chem. Unterricht, XIII. Jahrg. S. 161) abgeändert worden?

Antwort. An der Zimmerdecke oder an einem geeigneten festen Stative werden zwei schwere Fadenpendel von gleicher, etwa 2 m betragender Länge in einer Entfernung von 20 cm voneinander befestigt, die aus einem Bindfaden mit daran gehängten 2 kg schweren Gewichtsstücken bestehen. Hängt man nun in die Oesen mittelst kleiner Haken eine Gummischnur von 30 cm Länge, so bringt das eine Pendel das andere zum Mitschwingen, wenn man das erste in Schwingungen versetzt, deren Ebene senkrecht zu derjenigen Ebene steht, die durch die gemein-


Fig. 507.

same Ruhelage der Pendel geht. Bei kleiner Amplitude der Schwingungen schwingen nach ungefähr 10 Schwingungen beide Pendel gleich weit und behalten ihre Amplitude bei. Bei großer Amplitude werden die Schwingungen des ersten Pendels allmählich immer kleiner, und nach etwa 20 Schwingungen kommt das erste Pendel zur Ruhe, während das zweite Pendel seine größte Amplitude erhält. Nun versetzt wieder das zweite Pendel das erste in Schwingungen und verliert dabei selbst wieder an Schwingungsweite. Dieser Vorgang wiederholt sich in derselben Weise mehrere Male, ohne dass es nötig wäre, einen erneuten Anstoß zu geben.

Der erste Versuch ist geeignet um zu demonstrieren, dass zur Erzeugung der Resonanz bei den Schwingungen ein die Schwingungen übertragendes Medium (die Gummischnur) erforderlich ist. Der zweite Versuch dient zur Erklärung der Erscheinung, dass bei zwei auf dasselbe Monochord gespannten und unisono gestimmten Saiten abwechselnd die eine Saite ihre größte Amplitude erhält, während die andere zur Ruhe kommt.

Frage 957. Welche Tatsache wurde von dem englischen Uhrmacher Ellicot (1739) an zwei Uhren beobachtet, die nahezu gleich lange Pendel haben, und auf derselben Holzplatte befestigt sind?

Erkl. 885. Auf Ellicot's Beobachtung hin faßte Bréguet den Plan, zwei Chronometer auf derselben Metallplatte zu befestigen, die folglich stets übereingingen; da die individuellen Un-

Antwort. Wenn zwei Uhren, die nahezu gleiche Pendel haben, auf derselben Holzplatte befestigt werden, so gehen sie genau überein. Außerdem bemerkte Ellicot, dass die eine der beiden Uhren, wenn sie anfangs allein geht, die andere in Gang setzt, so dass deren Pendel mit voller Amplitude schwingt, sodann aber allmählich selbst stehen bleibt; dar-

regelmäßigkeiten alsdann ausgeglichen sind, so wäre der gemeinsame Gang besser als der jedes einzelnen Chronometers für sich. Da zwei ähnliche Saiten auf dem Resonanzboden eines Streichinstruments angebracht, sich gegenseitig in gleiche Schwingungen versetzen, so geht daraus hervor, dass man zwei Instrumente nicht zu nahe aneinander stellen darf, wenn man sie genau in Einklang bringen will, da sich sonst der Gleichklang von selbst herstellt, ohne dass jedes der Instrumente für sich allein denselben Ton zu geben braucht.

auf findet das Umgekehrte statt usw. Savart hat diese Beobachtung bestätigt und sie auf andere schwingende Körper ausgedehnt.

Frage 958. Wenn wir auf die Intensität achten, mit welcher sich die Schallwellen in durchweg gleichartigen und in einem andern Falle in ungleichartigen Medien fortpflanzen, so gelangen wir zu welchem Erfahrungssatze?

Antwort. Die Schallschwingungen pflanzen sich am vollkommensten in durchweg gleichartigen Medien fort, gleichwie auch die Schwingungen eines selbsttönenden Körpers sich am vollkommensten solchen Körpern mitteilen, die ihm gleichartig sind. So teilen sich die Schwingungen fester Körper am besten anderen diesen gleichartigen Körpern mit, während tönende Luft ihre Schwingungen am vollkommensten der Luft mitteilt.

Frage 959. Die Schwingungen starrer tönender Körper werden aber der Luft leichter mitgeteilt, wenn die Töne sehr hoch, als wenn sie tief sind. In welcher Weise haben die Gebrüder Weber (in ihrer Wellenlehre) diese Tatsache erläutert?

Erkl. 886. Wenn durch den Einfluß einer schwingenden Bewegung in benachbarten Körpern Schwingungen erzeugt werden, so werden die letzteren besonders dann stark hervortreten,

Antwort. Wird eine Stimmgabel angeschlagen, so bringt dieselbe einen doppelten Ton hervor; teils einen tieferen, der schon in einer geringen Entfernung von der in der Hand gehaltenen Stimmgabel nicht mehr wahrnehmbar ist, obschon derselbe, wenn man die Stimmgabel näher ans Ohr hält, stark und voll vernommen wird, und teils einen viel höheren, der besonders im Augenblicke des Anschlagens selbst bis zu einer beträchtlichen Entfernung vernommen werden kann, und auch noch

wenn der ankommende Ton einer der Eigentöne des mitschwingenden Körpers ist und je nachdem dieser die durch einen einmaligen Anstoß erteilten Schwingungen lange beibehält oder schnell wieder verliert. Ein schwingender Körper, der seine Bewegung lange beibehält, wie alle starren elastischen Körper, wird nur merklich mitschwingen und infolge dessen mittönen, wenn der ankommende Ton einer seiner Eigentöne ist; denn stimmen diese beiden Töne nicht mit einander überein, d. h. ist die Zahl ihrer sekundlichen Schwingungen wenig verschieden, so müssen sich die Eigenschwingungen des Körpers und die ankommenden Schwingungen gegenseitig stören, anstatt sich zu verstärken. Wenn dagegen die Schwingungen des zweiten Körpers, wie z. B. bei wenig gespannten feinen Membranen, sehr rasch an Stärke abnehmen, so kann ein solcher Körper auch in merkliche Schwingungen versetzt werden, wenn mit seinem Eigentone der ankommende Ton nicht übereinstimmt. Denn wenn ein Körper die infolge eines ersten Anstoßes entstehende Bewegung schon nach wenigen Schwingungen verliert, so wird jeder neue Anstoß ihm Bewegung erteilen, wenn auch die Schwingungszahl der ankommenden Bewegung eine etwas andere ist als jene durch den vorhergehenden Anstoß erregte. So kann z. B. eine Stimmgabel nur durch die Schwingungen einer ihr ganz gleich gestimmten zum Mitschwingen gebracht werden, während die Membran in dem Königschen Flammenzeiger jede Schwingungsart aufnimmt, durch welche sie getroffen wird.

längere Zeit schwach forttönt. Jener tiefe Ton wird nun beträchtlich verstärkt, wenn man die angeschlagene Stimmgabel auf eine große Holzplatte stemmt. Vom Stiele der Stimmgabel gehen dann Wellen aus, die sich auf der Holzplatte ausbreiten. Indem sich nun die Schwingungen einer Stimmgabel einer Holzplatte stärker als der Luft mitteilen, werden die Teilchen des Holzes, die sich bei der Fortpflanzung des Schalles hin und herbewegen, Schwingungen von gleicher Dauer in der Luft erregen, und dazu beitragen, dass der Luft die Schwingungen vollkommener mitgeteilt werden. Die Mitteilung der Schwingungen wird begünstigt, wenn eine große Zahl von Luftteilchen durch den festen schwingenden Körper gestoßen wird, d. h., wenn die schwingende Fläche des tönenden, oder in Schwingungen versetzten festen Körpers sehr groß ist. Hierauf beruht nun die Verstärkung eines Tones durch Resonanz (siehe weiter unten.) Dagegen wird der hohe Ton der Stimmgabel auf diese Weise nicht merklich verstärkt; er wird auch ohne Resonanz weitergehört, als der tiefe, an sich stärkere Ton. Wenn nämlich ein und dasselbe Luftteilchen in einer gegebenen Zeit viele Stöße von einem schwingenden Körper erhält, wie dies bei einem hohen Tone der Fall ist, so werden ihm die Schwingungen leichter mitgeteilt, als wenn es in derselben Zeit wenig Stöße erhält.

Frage 960. Wenn unter dem Einflusse schwingender Bewegungen in benachbarten Körpern Schwingungen erregt werden, so haben wir welche zwei wesentlich

Antwort. Wie schon aus der vorstehenden Erklärung hervorgeht, haben wir diejenige Art des Mitschwingens, bei welcher die

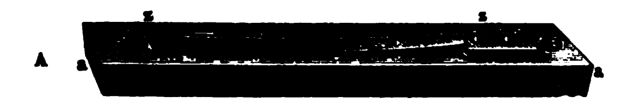
voneinander verschiedenen Arten des Mitschwingens zu unterscheiden?

ankommenden Wellen mit denjenigen des Eigentones des von ihnen getroffenen Körpers genau übereinstimmen zu unterscheiden von derjenigen Art des Mitschwingens, bei welcher eine solche Uebereinstimmung nicht stattfindet. Die erstere Art des Mitschwingens wird als Mittönen, die letztere Art als Resonanz bezeichnet.

Frage 961. Durch welchen Versuch
a) mit einer freien Zunge,
b) mit einer freien Stimmgabel können wir diese Unterschiede deutlich machen?

Antwort. Eine schwingende freie Zunge (Fig. 508) hat infolge ihrer geringen Oberfläche, mit der sie nur eine kleine Luftmenge treffen kann, einen äußerst schwachen Klang. Drücken wir sie aber an

Fig. 508.

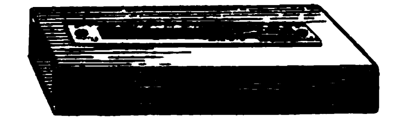


die Tischplatte und schnellen sie aus ihrer Gleichgewichtslage, so klingt der Ton jetzt merklich stärker. Es ist dies eine Folge der Resonanz der Tischplatte. Wird aber die Zunge mit einem gleichgestimmten Klangkästchen (dessen Eigenton wir hören können, wenn wir einen Luftstrom quer über seine Oeffnung blasen) verbunden, so hören wir bei gleicher Erregungsart einen äußerst kräftigen Klang, infolge des Mittönens der vom Kästchen eingeschlossenen Luftsäule.

Wir bemerkten schon in Antwort 959, dass der Ton einer schwingenden Stimmgabel durch Resonanz viel lauter wird, wenn wir den Stiel derselben auf die Tischplatte stützen. Bringen wir aber dieselbe tönende Gabel völlig frei einem Klangkästchen gegenüber, dessen Eigenton

Erkl. 887. Wenn die zu einem Körper gelangenden Schwingungen mit denen übereinstimmen, die er selbst ausführen kann, so gerät er als Ganzes in eine schwingende Bewegung, deren Weite oft bedeutend ist, während er sonst nur eine einfache Erschütterung erleidet, die allmählich seine verschiedenen Teile erreicht. Unter dem wiederholten Einfluse synchroner Impulse schwingt der ganze Körper im Einklange mit den äußeren Schwingungen oder er tönt mit, wie z. B. die Luftsäule einer Pfeife, deren Eigentöne den Tönen des Mundstückes entsprechen.

Fig. 509.



mit dem der Stimmgabel unisono ist, so vernehmen wir jetzt den Klang weit kräftiger als bei der direkten Erschütterung der Tischplatte, weil durch den Ton der Gabel die Luftsäule des Kästchens zum Mittönen gebracht wird.

Bringen wir nun die Gabel und das Kästchen in feste Verbindung, so tritt gleichzeitig Resonanz und Mittönen ein, und aus diesem Zusammenwirken ergibt sich die große Tonstärke.

---

b) Das Mittönen.

Frage 962. Was verstehen wir unter dem Mittönen?

Antwort. Unter dem Mittönen verstehen wir die Erscheinung, dass ein begrenzter Körper durch einen tönenden in so heftige Schwingungen versetzt wird, dass er schließlich selbständig tönt, insofern die Schallwellen, die dem begrenzten Körper mitgeteilt werden, von dessen Flächen oder Grenzen zurückgeworfen werden und sich miteinander, und mit den von dem tönenden Körper fortwährend ausgehenden Schallwellen durchkreuzen. Wenn nun die nachfolgenden Wellen ebenso verlaufen, wie die vorhergehenden und wenn sie von den Schwingungen eines und desselben Tones herrühren, so müssen sich auch an allen Durchkreuzungsstellen die Durchkreuzungen regelmäßig und in gleichen Zeiträumen wiederholen. Das Resultat ist, dass die ganze Bewegung der einzelnen Teilchen dieses Körpers sich durch nichts von der des selbsttönenden Körpers unterscheidet, die reflektierten Wellen interferieren mit den neu voranschreitenden zu stehenden Wellen,

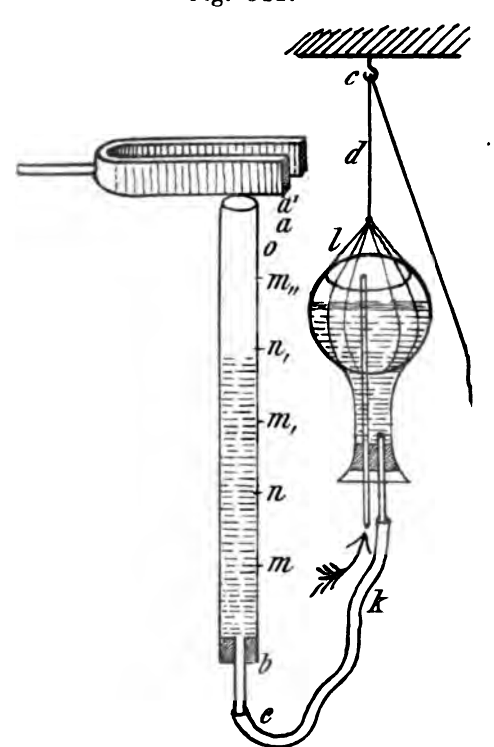
Erkl. 888. Wenn die Schallschwingungen eines Körpers nicht in einem benachbarten Körper Schwingungen von gleicher Dauer hervorrufen können, so findet auch keine Tonübertragung statt, und die Bewegung wandelt sich zumeist in Wärme um. Schwingen die Molekeln des zweiten Körpers schneller als die des ersten, so sind sie schon auf dem Rückwege, wenn die primären Wellen noch vorangehen, und durch Aufeinanderstoßen beider Wellenbewegungen werden die Schallschwingungen in kleinste Erzitterungen verwandelt; der Erfolg ist derselbe, wenn die sekundäre Bewegung langsamer erfolgt als die primäre. Stimmen aber die Perioden beiden Körpern miteinander überein, so kann jede Schwingung des ersten Körpers in gleichem Sinne auf den zweiten wirken und denselben allmählich in eine starke Bewegung versetzen, wie in den folgenden Zeilen noch weiter erörtert werden soll.

wodurch der Körper in ein selbständiges Tönen versetzt wird, welches auch noch fortdauern kann, wenn die erste Ursache des Tönens aufgehört hat.

Frage 963. In welcher besonders lehrreichen Weise läßt sich die merkwürdige Tatsache des Mittönens mit Hilfe einer Stimmgabel und eines Standglases zeigen?

Erkl. 889. Denselben Versuch führt Antolik in folgender verbesserter Form aus: Eine 113 cm lange und 4 cm weite Glasröhre ist mit einem starkwandigen Ansatzrohre *b e*, mit dem langen Kautschukschlauche *ek* und mit

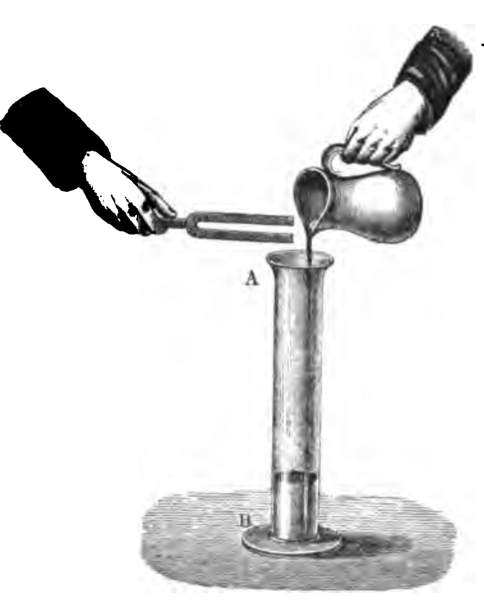
Fig. 511.



dem Glaskolben *l* so ausgerüstet, wie es die Fig. 511 andeutet. Wir stellen den Apparat auf den Fußboden, befestigen

Antwort. Wir nehmen ein zylindrisches Glasgefäß *A B* (Fig. 510) und lassen über demselben eine Stimmgabel schwingen. Wir

Fig. 510.



werden eine besondere Erscheinung nicht wahrnehmen. Wenn wir aber allmählich Wasser in das Gefäß gießen, so wird die darin enthaltene Luftsäule kürzer, und schließlich gelangen wir zu einem Punkte, wo wir den Stimmgabelton bedeutend verstärkt wahrnehmen. Blasen wir in diesem Falle sanft gegen den oberen Rand des Gefäßes, so vernehmen wir einen schwachen Orgelton, welcher mit dem der Stimmgabel vollkommen

ihn bei c an einem Tische, gießen die Glasröhre $a\,b$ durch die Oeffnung a voll Wasser und lassen dieses alsdann durch Herablassen des Kolbens bis b sinken und zur Ruhe kommen. Indem wir nun eine Stimmgabel mit einem Tuchhammer anschlagen, sie vor die Oeffnung a halten, zugleich aber das Wasser langsam steigen lassen, werden wir alsbald einen Punkt finden, bei welchem sich der Ton auffallend verstärkt. Diese Stelle m markieren wir mit einem weißen Bindfaden, lassen die Wassersäule höher steigen und suchen denjenigen Punkt auf, bei welchem nicht die geringste Verstärkung des Tones wahrnehmbar ist. Diese Stelle n markieren wir mit einem schwarzen Bindfaden. Auf diese Weise suchen wir alle Knotenstellen und Bäuche der in der Glasröhre befindlichen Luftsäule auf, und indem wir dieselben messen, finden wir die Entfernung zwischen m und n von $\frac{1}{4}$, zwischen m und m' von $\frac{1}{2}$ und zwischen m und m'' von einer Wellenlänge des Stimmgabeltones. Gelangt endlich die Wassersäule zum Punkte o, so ertönt klar der erste Oberton der Stimmgabel, den wir bis jetzt nicht wahrgenommen haben, welcher aber von nun an, da wir auf ihn aufmerksam geworden sind, immer hörbar ist.

übereinstimmt. Wenn wir dagegen von dem Wasser etwas ausgießen oder neues hinzufügen, so erhalten wir durch gleiches Blasen Töne, welche mit dem Stimmgabeltone nicht übereinstimmen, und in einem solchen Falle tritt auch kein Mittönen, also auch keine Tonverstärkung ein.

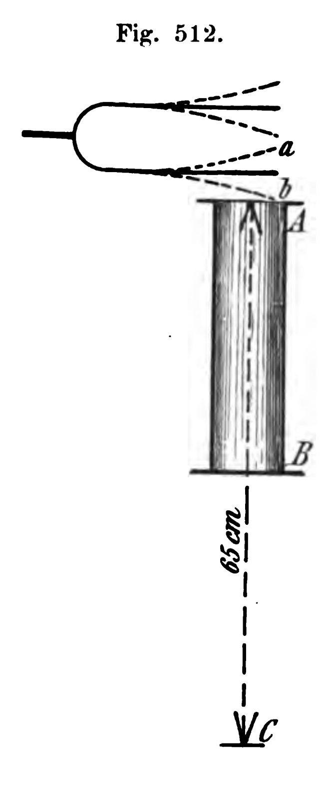
Frage 964. Wenn wir bei dem vorerwähnten Versuche Stimmgabeln von verschiedener Tonhöhe anwenden und jedesmal die Länge der Luftsäule nachmessen, bei welcher das Mittönen am stärksten eintritt, so gelangen wir zur Kenntnis welcher allgemeinen Regel?

Erkl. 890. Ersetzen wir bei dem nebenstehend beschriebenen Versuche die Luft in dem Standglase durch Leuchtgas. Die Schallgeschwindigkeit

Antwort. Die Länge der Luftsäule, welche den Ton der Gabel durch Mittönen verstärkt, ist gleich einem Viertel der Länge der Tonwelle, welche von der Gabel ausgeht. Nehmen wir z. B. eine Stimmgabel, welche das eingestrichene c gibt, also in einer Sekunde 256 Schwingungen ausführt, was einer Wellenlänge von 130 cm entspricht, so ist in dem Augenblicke, wo die Zinke den

in diesem Gase verhält sich zu der in der Luft etwa wie 8 : 5. Um also in gleichem Rhythmus wie die Gabel zu schwingen, muß die Leuchtgassäule im Gefäße 8/5 mal 32,5 d. h. 52 cm lang sein, um am stärksten mitzutönen.

Fig. 512.



Erkl. 891. Bringt man nach Planeth (1871) eine schwingende Stimmgabel in die Nähe einer Lichtflamme, so wird durch das Mittönen derselben der Ton der Gabel bedeutend verstärkt, am meisten, wenn die Flamme zwischen die Gabelzinken gebracht wird.

Punkt *b* erreicht, der vorderste Punkt der Tonwelle schon bei C, d. h. 65 cm von der Gabel entfernt. Die Luftsäule, welche bei dieser Gabel am stärksten mittönt, ist 32,5 cm, d. h. gleich $\frac{1}{4}$ von der Wellenlänge des Tones, welcher von der Gabel ausgeht. Denken wir uns die Zinke zwischen *a* und b hin- und herschwingend und unter ihr das Standgefäß A B. In der Zeit, welche die Gabel braucht, um von *a* nach *b* zu gelangen, geht die Luftverdichtung bis auf den Boden des Gefäßes nieder, wird hier reflektiert und, da die Entfernung bis zum Boden und wieder zurück 65 cm beträgt, so trifft die reflektierte Welle die Gabel in dem Augenblicke, wo sie beginnt, wieder von *b* nach *a* zurückzuschwingen. Durch diese Rückbewegung entsteht die Luftverdünnung der Welle, welche ebenfalls bis zum Boden des Gefäßes und wieder zurückläuft und die Zinke einholt, wenn sie gerade den Punkt *a* erreicht hat. Hieraus folgt, dass die Schwingungen der Gabel vollkommen gleichzeitig mit den Schwingungen der Luftsäule A B verlaufen, und infolge davon tönt die Luftsäule mit und bringt die gewaltige Anschwellung des Tones hervor.

Frage 965. In welcher Weise können wir ein analoges Experiment mittelst Stimmgabel und Orgelpfeife ausführen?

Erkl. 892. Man hebe leise und ohne die Saite anzuschlagen eine Taste eines Klaviers, so dass die betreffende Saite

Antwort. Wir bedienen uns einer auf einem Resonanzkästchen befestigten Stimmgabel. Dieselbe gibt mit dem Violinbogen gestrichen, einen klaren und reinen Ton. Bringen wir jetzt in die Nähe dieser tönenden Stimmgabel

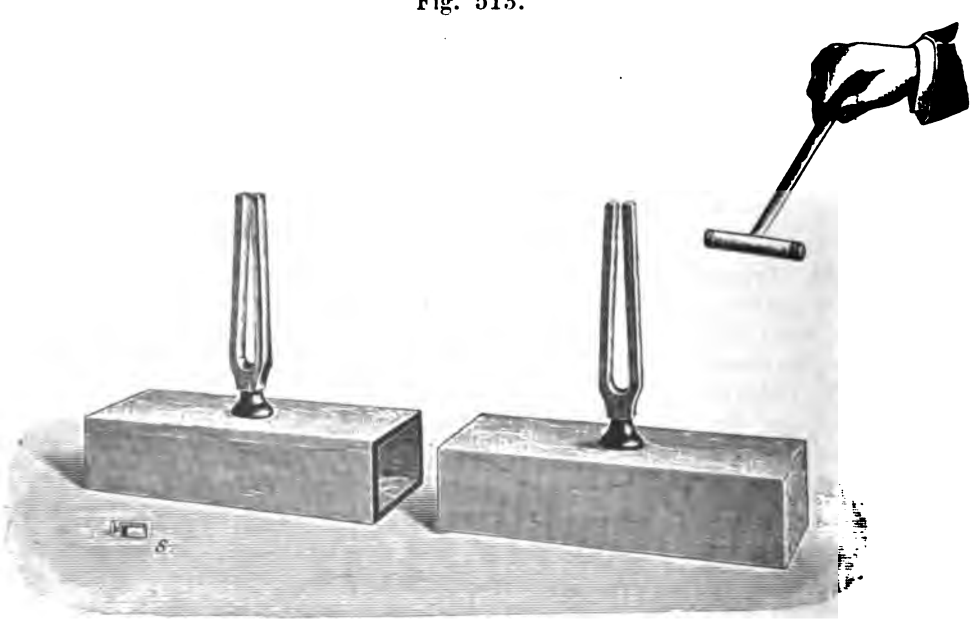
nur von ihrem Dämpfer befreit ist, und singe kräftig den Ton dieser Saite in das Innere des Klaviers, so wird man, indem man zu singen aufhört, den Ton aus dem Klaviere nachklingen hören. Man kann sich überzeugen, dass die dem gesungenen Tone gleichgestimmte Saite mittönt, denn wenn man die Taste losläßt, so dass der Dämpfer sich auf die Saite legt, dann hört das Mittönen auf. Noch besser erkennt man das Mittönen der Saite, wenn man einen Drahtring oder ein Papierschnitzelchen auf ihr reiten läßt. Diese werden abgeworfen, sobald die Saite in Schwingungen gerät.

eine Orgelpfeife, welche für sich selbst den nämlichen Ton gibt, so beginnt dieselbe alsbald mitzutönen. Wir können den Versuch aber auch in der Weise ausführen, dass wir die Orgelpfeife in der Nähe der schweigenden Gabel anblasen, nach kurzer Zeit hören wir dann von der Stimmgabel denselben Ton, auch wenn die Pfeife bereits aufgehört hat zu tönen.

Frage 966. Körper von geringer Masse, wie Luftsäulen und Membranen sind leicht zum Mittönen zu bringen, weil die Luftbewegung leicht auf sie übertragen wird. Dagegen sind massige elastische Körper, wie Glocken, Platten und Stimmgabeln nur schwer zum Mittönen zu bringen.

Antwort. Zu diesem Zwecke muß man die Stimmgabeln auf Resonanzkästen befestigen, die selbst auf den Ton der Gabel abgestimmt sind. Hat man zwei derselben, die genau gleiche Schwingungsdauer haben, und streicht die eine Gabel mit dem Violinbogen,

Fig. 513.



Durch welches Experiment läßt sich diese Erscheinung mittelst zweier gleichen Stimmgabeln zeigen?

Erkl. 893. Den vollständigen, zu dem nebenstehend beschriebenen Versuche notwendigen Apparat liefert die Firma Ferdinand Ernecke, Berlin SW. zu dem Preise von 30 bis 40 ℳ. Das Ansprechen einer Stimmgabel beim Anschlagen einer ihr genäherten, gleichgestimmten, kann man auch ohne Resonanzkästen sehr leicht sichtbar machen, wenn man dieselben mittelst Korken auf zwei Medizinflaschen be-

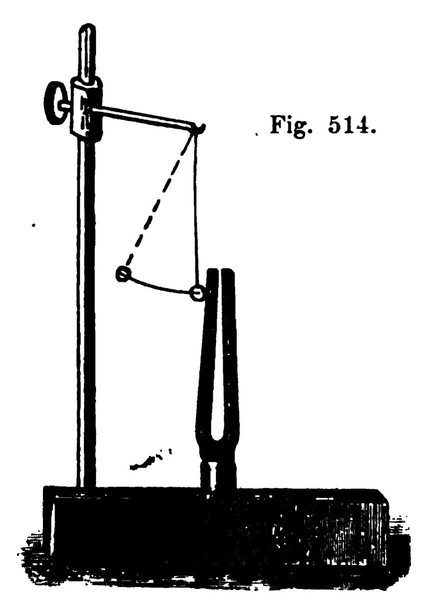


Fig. 514.

festigt und eine der Stimmgabeln mit einem leichten Pendelchen, aus einer größeren Glasperle hergestellt, in Berührung bringt. Stellt man die Stimmgabeln in 20 bis 30 cm Entfernung voneinander auf den Tisch und schlägt die eine derselben an, so wird das Pendelchen der andern abgestoßen. Auch bei dem in der nebenstehenden Antwort beschriebenen Versuche kann man das Mittönen der zweiten Gabel durch Anbringen eines Pendelchens nachweisen. (Siehe Fig. 514.)

oder schlägt sie mit einem befilzten Hammer an (siehe Fig. 513) so fängt auch die andere an mitzutönen, selbst wenn sie an einem entfernten Orte desselben Zimmers steht, und man hört die zweite den Ton fortsetzen, wenn man die Schwingungen der ersten dämpft. Ein Mittönen erfolgt aber nicht, wenn beide Stimmgabeln nicht genau den nämlichen Ton geben. Wollen wir uns davon überzeugen, so brauchen wir nur zwei verschiedene Stimmgabeln zu nehmen oder auch den Ton der einen Stimmgabel dadurch um einige Schwingungen zu verändern, dass wir auf die eine Zinke einen kleinen Messingschieber *s* (Fig. 513) schrauben, wodurch der Ton vertieft und dadurch ein Mittönen verhindert wird. Hierbei ist übrigens die Zeit, welche die zweite Gabel braucht, um durch Mittönen in volle Schwingungen zu kommen, von merklicher Größe.

Frage 967. Wenn wir bedenken, dass ein Kubikmeter Luft 1,293 kg, dagegen ein Kubikmeter Eisen etwa 7500 kg wiegt, die Masse des Eisens also 5800 mal so schwer ist als die der atmosphärischen Luft, so muß uns bei einem Vergleiche der so schweren Stahlmasse mit der dünnen und leicht beweglichen Luftmasse der vorerwähnte Fall des Mittönens sehr überraschend erscheinen. Auf welche Weise suchte nun Helmholtz sehr anschaulich zu erklären, wie es möglich ist, dass auch durch schwache periodische Anstöße, von einem regelmäßig schwingenden Körper ausgehend, in einem elastischen Körper von großer Masse und gleicher Schwingungsperiode nach einiger Zeit sehr starke Schwingungen hervorgerufen werden können?

Erkl. 894. Bei einem mittönenden Körper muß der ganze Raum desselben von gleich langen, sich mehrfach kreuzenden Wellen eingenommen sein, die infolge der Gestalt des Körpers so zurückgeworfen werden, dass die Kreuzungspunkte auch nach einer vielfachen Zurückwerfung immer nach gleichen Zeiträumen auf dieselben Punkte fallen.

Hieraus folgt:

1. dass die Wellen mittönender Körper eine Länge haben müssen, die ein aliquoter Teil des Weges ist, den die Welle von einer zurückwerfenden Grenze des Körpers zur andern zu durchlaufen hat. Dies ist bei Körpern, die zur Resonanz fähig sein sollen, nicht nötig.

2. Dass bei mittönenden Körpern jede Welle einen Weg durchläuft, vermöge dessen sie nach einer oder mehreren Zurückwerfungen in ihren vorigen Weg zurückkehrt, was bei der Resonanz nicht der Fall ist;

3. dass die Stärke des Tones bei einem mittönenden Körper wachsen

Antwort. Helmholtz suchte das Wesen dieses Vorganges in folgender Weise deutlich zu machen:

„Es ist bekannt, dass die größten Kirchenglocken durch taktmäßiges Ziehen an dem Glockenseile von einem Manne oder selbst einem Knaben in Bewegung gesetzt werden können, Glocken von so großem Metallgewichte, dass der stärkste Mann, welcher sie aus ihrer Lage zu bringen sucht, sie kaum merklich bewegt, wenn er seine Kraft nicht in bestimmten taktmäßigen Ansätzen anwendet. Ist eine solche Glocke einmal in Bewegung gesetzt, so setzt sie wie ein angestoßenes Pendel, ihre Schwingungen noch lange fort, ehe sie allmählich zur Ruhe kommt, auch wenn sie ganz sich selbst überlassen bleibt, und eine Kraft zur Unterstützung ihrer Bewegungen da ist. Allmählich freilich nimmt ihre Bewegung ab, indem Reibung an den Achsen und Luftwiderstand bei jeder einzelnen Schwingung einen Teil der vorhandenen Bewegungskraft der Glocke vernichten.

Während die Glocke hin- und her schwankt, hebt und senkt sich der Hebel mit dem Glockenseil, der oben an ihrer Achse befestigt ist. Wenn nun, während der Hebel sich senkt, ein Knabe sich an das untere Ende des Glockenseils anhängt, so wirkt die Schwere seines Körpers so auf die Glocke, dass sie deren eben vorhandene Bewegung beschleunigt. Diese Beschleunigung mag sehr klein sein, und doch wird sie eine entsprechende Vermehrung der Schwingungsweite der Glocke bewirken, die sich auch wiederum eine Weile erhält, bis sie durch Reibung und Luftwiderstand vernichtet ist. Wollte der Knabe sich aber zur unrechten Zeit an das

kann, während die Erregung der Schwingungen gleichmäßig fortdauert, z. B. während der Violinbogen fortfährt zu streichen, der Ton bis zu einem gewissen Punkte anwächst, weil nämlich die mehrfach zurückgeworfenen Wellen immer in die ursprüngliche Lage zurückkehren, und daselbst durch neu erregte Wellen verstärkt werden, was bei resonierenden Körpern nicht der Fall ist;

4. dass der mittönende Körper durch Stöße zum Schwingen gebracht wird, die nicht so regelmäßig und geschwind zu erfolgen brauchen, dass sie selbst einen Ton bilden; so dass nicht der Inbegriff der empfangenen und fortgepflanzten Stöße den Ton des tönenden Körpers bildet, da nur eine gewisse Ordnung regelmäßig aufeinanderfolgender Stöße nötig ist, um einen Körper zum Tönen zu bringen, auch wenn die Stöße viel langsamer aufeinander folgen, als die Schwingungen des dadurch zum Mittönen gebrachten Körpers. Dagegen muß der resonierende Körper, wenn er tönen soll, so regelmäßige Stöße bekommen, dass diese Stöße selbst schon einen Ton bilden, daher ein resonierender Körper nur den Ton wiederholen kann, den die Tonquelle hervorbringt.

Erkl. 895 Als König im Verlaufe der Regnault'schen Versuche im Kanal Saint-Michel zwei Stimmgabeln mit dem Tone *c* so aufgestellt hatte, dass sich die Oeffnungen ihrer Resonanzkästen an den Enden des Kanals gegenüberstanden, bemerkte er den Einfluß der Schallwellen auf die zweite Gabel selbst bei einem Abstande von 1590 *m* noch sehr deutlich.

Glockenseil anhängen, während dieses aufsteigt, so würde die Schwere seines Körpers der Bewegung der Glocke entgegenwirken und die Schwingungsweite verkleinern. Wenn sich nun der Knabe bei jeder Schwingung so lange an das Seil hängt, als dieses sich senkt, und es so lange frei läßt, als es sich hebt, so wird er bei jeder Schwingung die Bewegung der Glocke nur beschleunigen, und ihre Schwingungen so allmählich größer und größer machen, bis durch die Vergrösserung der Schwingungen auch die bei jeder Schwingung von der Glocke an die Turmwände und die Luft abgegebene Bewegung so groß wird, dass sie durch die Kraft, die der Knabe bei jeder Schwingung aufwendet, gerade gedeckt wird.

Der Erfolg dieses Verfahrens beruht also wesentlich darauf, dass der Knabe seine Kraft immer nur in solchen Augenblicken anwendet, wo er durch sie die Bewegung der Glocke vergrößert. Er muß also seine Kraft periodisch in Tätigkeit setzen, und die Periode dieser Tätigkeit muß gleich der Periode der Glockenschwingungen sein, wenn er Erfolg haben will. Er würde ebenso gut die vorhandene Bewegung der Glocke auch schnell zur Ruhe bringen können, wenn er sich an den Strick hinge, während dieser aufsteigt, und so das Gewicht seines Körpers von der Glocke heben ließe."

Frage 968. Durch welchen Versuch läßt sich nachweisen, dass ein Körper nicht allein durch seinen G r u n d t o n, sondern auch durch seine h a r m o n i s c h e n O b e r t ö n e zum Mitschwingen angeregt werden kann?

Antwort. Wir nehmen hierzu das Monochord (Fig. 515), auf welchem zwei gleiche Saiten aufspannt und auf denselben Ton abgestimmt sind, und setzen auf die eine Saite kleine Drahtringe oder

Erkl. 896. Bei dem nebenstehenden Versuche findet eine schwingende Bewegung der zweiten Saite nicht mehr statt, sobald dieselbe etwas stärker oder weniger stark angespannt wird und hierdurch ein Tonunterschied entsteht. In diesem Falle können wir die erste Saite als Ganzes oder in beliebigen Teilen streichen, ohne dass die zweite Saite in Schwingungen gerät. Hieraus geht hervor, dass es nicht etwa die Erschütterungen des Instrumentes sind, durch welche die Erscheinung des Mittönens verursacht wird.

Papierreiter; nun streichen wir mit dem Violinbogen die andere Saite an; sie gibt den Grundton und alle auf der zweiten Saite sitzenden Reiterchen werden in die Höhe geworfen.

Wir setzen die Reiterchen wieder auf, berühren die erste Saite in der Mitte mit dem Finger und streichen sie mit dem Bogen, wodurch die höhere Oktave des Grundtons entsteht. Die zweite Saite schwingt auch in diesem Falle genau wie die primäre Saite, d. h. alle ihre Reiterchen geraten in Bewegung, mit Ausnahme desjenigen, welches in der Mitte sitzt; folglich befindet sich hier ein Knoten.

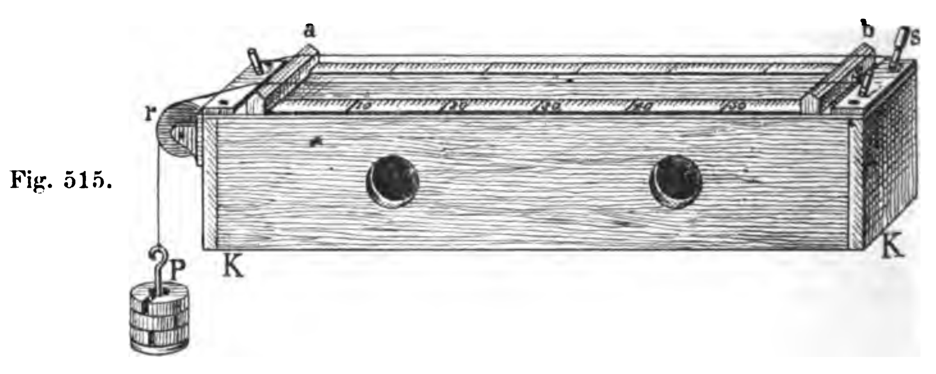


Fig. 515.

Erkl. 897. Wenn man in der Nähe eines Klaviers, einer Violine oder eines anderen Saiteninstruments einen Ton hervorbringt, der ein harmonischer Oberton einer der Saiten dieser Instrumente ist, so hört man sie auf das deutlichste mitklingen. Bei diesen Versuchen wird zunächst der Resonanzboden der Instrumente von den Tonschwingungen getroffen. Die hierdurch erregten Erschütterungen werden von der breiten biegsamen Holzplatte des Resonanzbodens nach den Befestigungspunkten der Saiten hingeleitet, und durch die lange Reihe der aufeinander folgenden Erschütterungen entstehen schließlich tönende Schwingungen der Saite.

Ebenso geben Pfeifen und Gläser, wie überhaupt eingeschlossene Luftsäulen Töne an, wenn man einen ihrer harmonischen Töne in der Nähe erzeugt.

Sondern wir durch Auflegen des Fingers ¼ der Saite ab und streichen dasselbe mit dem Bogen an, so erhalten wir die zweite Oktave des Tones der ganzen Saite, indem die letztere in vier gleichen Teilen schwingt. Sofort zeigt sich, dass auch die zweite nicht abgeteilte Saite mit der ersten isochron schwingt, denn hält man die erste rasch fest, so hört man noch eine Zeit lang genau denselben Ton auf der zweiten Saite, und bringt man auf diese kleine Reiter, so werden dieselben abgeworfen mit Ausnahme der Stellen der Schwingungsknoten.

Frage 969. Ein Mittönen kann sowohl durch einen einzelnen Ton, als auch durch ein Tongemisch hervorgerufen werden; aber nur unter welchen Umständen kann ein Tongemisch einen andern Körper zum Mittönen bewegen?

Erkl. 898. Die zusammengesetzte Bewegung eines Tongemisches zerlegt sich bei seinem Auftreffen auf einen benachbarten Körper immer in ihre elementaren Teilbewegungen, folglich kann ein Teilton eines Tongemisches einen Körper nur dann zum Mittönen anregen, wenn derselbe mit irgend einem Eigentone (Grund-, Ober- oder Nebentone) übereinstimmt. Hierauf beruht die Konstruktion der Resonatoren vom Helmholtz.

Antwort. Ein Tongemisch kann einen Körper nur dann zum Mittönen bewegen, wenn einer der Teiltöne des Tongemisches in seiner Tonhöhe oder Schwingungsdauer übereinstimmt mit einem der Töne, die der Körper bei selbständigem Tönen vermöge seiner Dimensionen und seiner Elastizität entwickeln kann.

Frage 970. Mit Hilfe welches Apparates läßt sich das vorstehende Gesetz experimentell beweisen?

Fig. 516.



Antwort. Mittelst der von Helmholtz konstruierten Resonatoren kann man aus einem Tongemisch einzelne Töne von bestimmter Höhe unterscheiden. Die Wirkung dieser Apparate beruht auf dem Mittönen einer mehr oder weniger abgeschlossenen Luftmasse.

Bringen wir die enge Oeffnung b des Resonators (Fig. 516) in den Gehörgang, und dringen die Schallwellen in die weite Oeffnung *a* hinein, so hören wir denjenigen Ton in sehr hohem Grade verstärkt, dessen Höhe mit der Tonhöhe der Eigenschwingungen der in dem Resonator enthaltenen Luftsäule übereinstimmt. Steckt man einen solchen, auf einen gewissen Ton abgestimmten Resonator ins Ohr, so hört man den Ton häufig im Tagesgeräusch.

Frage 971. Durch welchen von Helmholtz angegebenen Versuch läßt sich nachweisen, dass eine Saite des Monochords auch auf einen Oberton der Stimmgabel mitzutönen imstande ist?

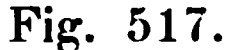
Antwort. Während man den Stiel einer schwingenden Stimmgabel gegen eine Saite andrückt, bewegt man die Gabel gleitend längs der Saite hin. Jedesmal, wenn man nun einen Punkt erreicht, wo für den mit dem Gabeltone übereinstimmenden Oberton der Saite ein Knotenpunkt liegt, tönt die Saite deutlich in diesem Obertone mit.

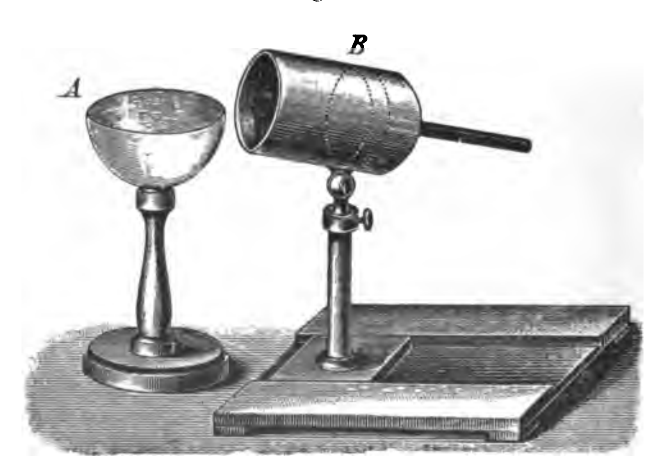
Erkl. 899. Vor Ausführung des nebenstehenden Versuchs feilt man die Grundfläche des Gabelstiels ein wenig aus, so dass derselbe nicht von der Saite abgleitet. Auch darf die Gabel die Saite nur in einer äußerst kleinen Oberfläche berühren und muß, wenn der Versuch gelingen soll, genau auf den bestimmten Knotenpunkten stehen.

Frage 972. Einen sehr schönen Beweis des Mittönens bietet auch die Savart'sche Glocke. Welcher Art ist der unter diesem Namen bekannte Versuch?

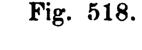
Antwort. Einer starken Glasglocke *A* (Fig. 517) gegenüber steht ein Holz- oder Pappzylinder, welcher mit verschiebbarem Boden versehen ist; auch läßt sich der Zylinder auf seiner Unterlage gegen die Glocke hin leicht verschieben. Streicht man die Glocke mit dem Violinbogen, so tönt sie. Schiebt man nun den beweglichen Zylinderboden hin und her (wodurch die Dimensionen der Luftsäule im Zylinder verändert wer-

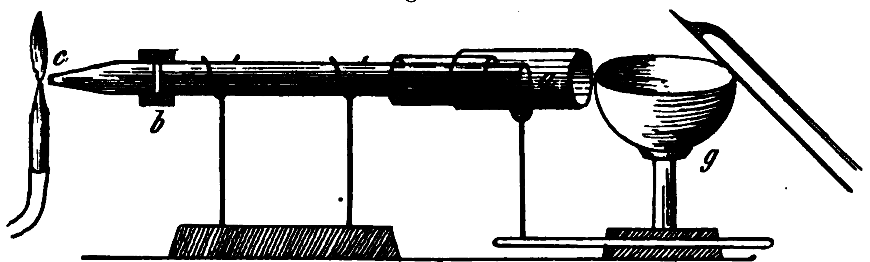
Erkl. 900. Dieselbe Savart'sche Glocke können wir auch benutzen (wie Antolik gezeigt hat) um zu beweisen, wie schnell sich die Schallwellen fortpflanzen und zugleich, dass dabei nur Schwingungen an Ort und Stelle aber keine Luftströmungen auftreten. Zu diesem Zwecke nehmen


Fig. 517.



wir die Savart'sche Glocke g (Fig. 518) und ziehen das Papierrohr so weit aus, dass seine Luftsäule dem Grundtone der Glocke entsprechend, leicht mittönen kann. Hierauf setzen wir eine recht lange und etwa 4 cm weite Glasröhre $a\,b$ in das Papierrohr so ein, wie es die beistehende Figur andeutet. Nun versehen wir das Ende b der langen Glasröhre mittelst eines Korkes mit dem Glastrichterchen $b\,c$, das eine kleine Oeffnung von 2 bis 3 mm hat; stellen endlich vor dieser Oeffnung eine 20 bis 25 cm hohe Gasflamme auf und streichen die Glocke mit einem Violinbogen


Fig. 518.



so, dass sie ihren tiefsten Ton gibt. In diesem Augenblicke erzittert die Flamme sehr heftig und singt so laut mit, dass ihr Ton weithin hörbar wird. Stellen wir alsdann vor der Oeffnung c eine brennende Kerze auf, so löscht diese unbedingt aus, namentlich wenn der untere Teil ihres Dochtes möglichst nahe an die Oeffnung c zu liegen kommt.

Es scheint dabei, als wenn die Luft aus der Oeffnung der Glasröhre herausströme, aber wenn wir in die Röhre zarte Goldblättchen oder Tabakrauch bringen, so beweist der Veruch überzeugend, dass in derselben auch nicht die geringste Luftströmung herrscht.

den, so findet man bald den Punkt, wo die Tonverstärkung am größten ist. Lassen wir den Glockenton so weit ausklingen, dass er kaum noch hörbar ist, und nähern der Glocke jetzt den Zylinder, so kommt der Ton wieder sehr stark zum Vorschein; ein Beweis, dass die Tonverstärkung nur dann eintritt, wenn sich in der Nähe des tönenden Körpers andere Körper befinden, welche für sich den nämlichen Ton zu geben vermögen.

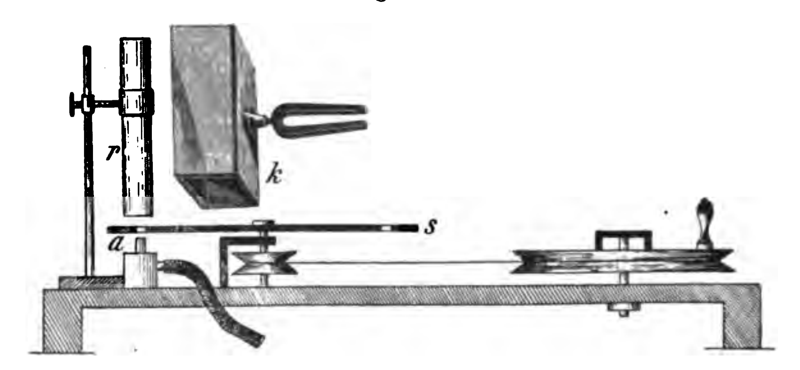
Frage 973. In welcher Weise können auch die Luftstöße einer rotierenden Sirenenscheibe den Eigenton einer Luftsäule erregen?

Antwort. Wir benutzen zu diesem Zwecke die in (Fig. 519) dargestellte Anordnung. Wird die Scheibe s von unten angeblasen und über derselben, dem Anblaseröhrchen a gegenüber, eine

Erkl. 901. Setzt man statt der Röhre ein mit einer Stimmgabel versehenes Klangkästchen den Luftstössen der Sirene aus, so wird in gleicher Weise der Eigenton des Kästchens, dadurch aber auch zugleich die Gabel selbst (sobald ihr Ton mit jenem des Kästchens übereinstimmt) zum Tönen gebracht werden.

offene oder gedeckte Röhre *r* gehalten, so wird, sobald der Sirenenton mit dem Eigentone der Röhre übereinstimmt, letzterer sich kräftig hören lassen.

Fig. 519.



c) Die Resonanz.

Frage 974. Was versteht man unter der **Resonanz**, und welche Tonerreger sind besonders mit einem resonierenden elastischen Körper zu versehen?

Antwort. Unter **Resonanz** versteht man die Anwendung des Mitschwingens elastischer Körper zur Verstärkung schwacher Töne. Wenn die Tonerreger kleine Oberflächen haben, also nur eine geringe Luftmenge in Bewegung zu setzen vermögen, und wenn der Ton aus dem Tonerreger in ein ganz anderes Medium übergehen muß, ehe er zu unserm Ohre gelangt, dann klingen die Töne nur schwach, denn die schon anfänglich schwache Wellenbewegung wird beim Durchgange durch verschiedene Medien (wie schon in Antwort 958 bemerkt wurde) noch mehr geschwächt.

Erkl. 902. Eine Stimmgabel für sich allein angeschlagen klingt ohne Resonanzplatte sehr schwach; Saiten an Bleiklötzen befestigt geben kaum hörbare Töne; dagegen haben die Blasinstrumente, in welchen eine große Luftsäule den Ton bildet, schon an sich einen starken Klang; dasselbe gilt von Glocken, welche (wie Weber sagt) ihren Resonanzboden in sich tragen und da-

her viel stärker klingen als eine gleich große ebene Scheibe. Eine Geige dagegen verdankt die Kraft ihres Klanges nur der Resonanz ihres Kastens, auf welchem die Saiten ausgespannt sind; ebenso ist beim Klavier die Stärke des Tones wesentlich abhängig von der Güte des mitschwingenden Resonanzbodens, mit welchem die Saiten durch den Steg, durch welchen sie gezogen sind, in Verbindung stehen.

Derartige Tonerreger, wie z. B. straff gespannte Saiten, bedürfen deshalb zur Verstärkung ihres Tones der sogenannten resonierenden Körper.

Frage 975. Wie genugsam bekannt ist, werden nun die an sich schwachen Töne der Tonerreger mit kleinen Oberflächen durch welche Mittel bedeutend verstärkt?

Antwort. Da die Tonhöhe durch die an starre elastische Körper übertragenen Mitschwingungen nicht geändert wird, so benutzt man diese Erscheinung in der Musik, um durch Verbindung der Tonerreger mit größeren trockenen elastischen Holztafeln, oder auch mit Holzkästen, die eine größere Luftmenge einschließen, die erzeugten Töne zu verstärken. Es werden dann die Schwingungen der über Stege gespannten Saiten, durch die auf dem Resonanzboden feststehenden Stege auf die Holztafeln übertragen, dieselben schwingen mit oder resonieren und erzeugen längs ihrer ganzen Oberfläche in der Luft Verdichtungen und Verdünnungen, die sich von dieser Oberfläche aus in fortschreitenden Wellen durch eine große Luftmenge hindurch ausbreiten. Man nennt diese Holztafeln Resonanzböden. Bei der Resonanz von Holzkästen wirkt zur Verstärkung des Tones auch wesentlich das eingeschlossene Luftvolumen mit, da dasselbe durch sämtliche umliegenden Wände in Schwingungen versetzt wird und dieselben leicht an die äußere Luft übertragen kann.

Erkl. 903. Die meisten musikalischen Instrumente, deren Tonerreger aus Saiten oder Stäben (Zungen) bestehen, haben einen eigenen Resonanzboden, bei dessen Bau es vorzüglich darauf ankommt, durch recht trockenes und feinfaseriges, möglichst elastisches Holz eine große und doch dünne Fläche herzustellen, durch welche für alle Töne ein angenehmes Mitklingen erzeugt wird. Chladni bemerkt, dass eine Stimmgabel, deren Ton zuletzt unhörbar wird, nicht nur wieder sehr vernehmlich zu klingen anfängt, wenn man ihren Stiel auf einen Resonanzboden stemmt, sondern, dass man sogar auf letzterem die einzelnen Stellen auffinden kann, wo sie, auf einem Schwingungsbauche stehend, vernehmlicher klingt, als auf einem Schwingungsknoten. Ein auffallender Beweis des bedeutenden Einflusses der mitschwingenden Körper liegt in dem bedeutenden Unterschiede des Tones einer und derselben Stimmgabel, je nachdem sie auf einen festen Stein, ein massives Stück Holz, einen Resonanzboden, eine Eisenplatte, eine Glasscheibe usw. gestützt wird.

Frage 976. Inwiefern erklärt sich die tonverstärkende Wirkung der mitschwingenden Resonanzplatte unmittelbar aus den Gesetzen der Mechanik?

Erkl. 904. Am leichtesten resonieren diejenigen Körper, welche schnell ausklingen, wenn sie selbst zum Tönen gebracht werden; denn diese geben ihre Bewegung leicht an die Luft ab und werden deshalb auch leicht rückwärts durch Luftschwingungen in Bewegung gesetzt. Bei den Resonanzplatten aller Saiteninstrumente kommt es darauf an, dass der Eigenton der ersteren möglichst tief und daher fähig ist, durch jeden Ton in entsprechende Mitschwingung versetzt zu werden. Man nennt dies die erzwungene Resonanz, zum Unterschiede von der natürlichen, die in der Verstärkung durch Mittönen des Eigentones oder eines Teiltones der Resonanzplatte besteht.

Antwort. So lange Saiten oder transversal schwingende Stäbe von kleiner Ausdehnung allein in der Luft schwingen, setzen sie nur kleine Luftmengen in Bewegung, wenn sie aber mit ausgedehnten elastischen Flächen in Verbindung stehend, diese in isochrone Mitschwingungen versetzen, so wird durch diese Schwingungen eine größere Luftmenge in Bewegung versetzt, und mit der Masse der schwingenden Teilchen wächst die Intensität des Tones.

Frage 977. Was aber durch Resonanz an Intensität des Tones gewonnen wird, das geht an der Dauer desselben verloren; was nehmen wir nämlich wahr, wenn wir dieselben Tonerreger mit und ohne Resonanzboden in dieser Beziehung miteinander vergleichen?

Erkl. 905. Biot erzählt, dass in den Theatern Italiens der Fußboden des Orchesters in möglichst wenigen Punkten mit dem Gebäude verbunden ist und auf leichten Rahmen ruht; unter ihm aber ist ein hohler, nach vorn offener Raum, welcher wie ein großes Sprachrohr die Töne durch gleichzeitiges Mitklingen mit den Instrumenten erregt, mitsamt diesen in das Theater sendet, genauer genommen aber wie ein Resonanzboden wirkt.

Antwort. Eine Stimmgabel oder eine zwischen schweren unbeweglichen Metallstücken ausgespannte Saite behalten, wenn sie für sich schwingen, ihre Bewegung lange bei, mit einem Resonanzboden verbunden verlieren sie dagegen ihren Ton sehr rasch, weil in letzterem Falle ihre Energie eher auf die Luft übergeht.

Frage 978. Aus dem in vorstehender Antwort erwähnten Grunde läßt sich erwarten, dass die Enden der gespannten Saiten sehr geeignet sind, der Saite von außen her Energie zuzuführen und die Saite in eine fast freie Schwingung zu versetzen. Inwiefern liefert das oben erwähnte Mittönen der Saite ein Beispiel hierzu?

Erkl. 966. Die Gesetze, nach welchen die Resonanzflächen, sowie die für vieltönige Instrumente geeigneten Hohlräume beschaffen sein müssen, sind auf dem Wege der Erfahrung gefunden worden. Bei Instrumenten, deren Tonerregung (wie bei Klavier oder Zither) durch Schlag oder Zerrung erfolgt, sollen die Resonanzflächen theoretisch eine solche Ausdehnung haben, dass sie sich den Schwingungen des tiefsten Tones anpassen. Dieser Anforderung entspricht aber nur das Klavier, während der Resonanzraum der Zither für ihren Tonumfang viel zu klein ist, weshalb Zitherspieler ihr Instrument, zumal mit Rücksicht auf die tiefen Baßtöne, auf einen sog. Resonanztisch stellen. Der Körper der Harfe bildet aus diesem Grunde bereits eine Art verstärkenden Hohlraums; die Zither und die Guitarre aber bilden die Uebergangsform zu den Streichinstrumenten, indem sie einen allseitig abgeschlossenen, nur durch eine verhältnismäßig kleine Oeffnung mit der Außenluft kommunizierenden Hohlraum besitzen.

Antwort. Die schwingende Saite, welche direkt keine Schallwellen von merklicher Intensität in der Luft zu erzeugen vermag, wird durch die sie treffenden Wellen der fernen Tonquelle auch nicht direkt in Schwingungen versetzt, sondern ihr Mittönen muß dem Umstande zugeschrieben werden, dass die Schallwellen den Resonanzboden in Schwingungen versetzen, durch welche dann wieder die Schwingungen auf die Stege und sodann auf die Saiten übertragen werden. Auch die Obertöne der Saiten werden auf diese Weise durch Töne erregt, welche mit jenen Obertönen gleiche Höhe haben.

Frage 979. Wie erklärt es sich, dass die Resonanz (wenn auch nicht auf die Höhe eines erregten Tones, so doch) auf die Klangfarbe einen wesentlichen Einfluß hat?

Erkl. 967. Man nennt denjenigen Teil der Streichinstrumente, dem die

Antwort. Die Resonanz hat einen wesentlichen Einfluß auf den Klang, weil die in einem jeden Klange vorhandenen Partialtöne durch Resonanz nicht in demselben Verhältnisse verstärkt werden. Der Klang einer Geige

Aufgabe der Resonanz zufällt, wegen seiner Wichtigkeit für die Tonerregung Corpus (d. h. Leib oder Körper). Obwohl jeder Hohlraum seinen Eigenton hat, so kann doch von einem Mittönen des Corpus keine Rede sein, da dasselbe nur dort eintreten kann, wo ein bestimmter Ton verstärkt werden soll, was bei den Streichinstrumenten keineswegs beabsichtigt wird, denn die Güte eines solchen Instruments besteht gerade darin, dass seine Töne in allen Höhelagen möglichst gleich stark sind. Es sind deshalb bei allen diesen Instrumenten die Schwingungserschütterungen der Saiten auf möglichst große mitschwingende Flächen zu übertragen. Je größer dieselben sind, um so mehr sind sie geeignet, Tonreihen von großem Umfange zu verstärken.

ist deshalb ein ganz anderer als der einer freien mit dem Bogen gestrichenen Saite. Ja, der Klang der Geige wird ganz wesentlich von der Güte des Resonanzkastens bedingt, indem nur ein sehr elastischer gut gearbeiteter Kasten die höheren Partialtöne ebenso verstärkt als die tieferen.

Frage 980. Welches sind die wesentlichen Bedingungen einer richtig funktionierenden Resonanzplatte?

Erkl. 908. Die Resonanzräume solcher Instrumente, deren Saiten durch Reißen in Schwingungen versetzt werden, besitzen, je größer diese Räume sind, um so weniger Eigenton, da die kommunizierenden Oeffnungen zwischen der inneren und äußeren Luft zu groß sind, um stehende Schwingungen des ungenügend begrenzten Luftvolumens zu ermöglichen. Es tritt also auch hier keine Verstärkung der einzelnen Töne durch Mittönen ein, sondern dem Resonanzraume fällt nur die allgemeine Aufgabe zu, die von der Unterfläche der schwingenden Resonanzplatte ausgehenden und von der Bodenplatte reflektierten Schallstrahlen zu konzentrieren und an die Außenluft abzugeben.

Antwort. Die wesentlichen Bedingungen einer richtig funktionierenden Resonanzplatte sind möglichste Elastizität und zugleich ein hoher Grad von Widerstandsfähigkeit, um dem Drucke, welchen die Bespannung ausübt, gewachsen zu sein. Dieser Druck entspricht bei unsern heutigen Klavieren einer Last von 11 000 kg; bei der Violine von 28 kg, bei der Viola von 31 kg, beim Violoncell von 45 kg und beim Kontrabasse von 200 kg.

Um einer solchen Belastung widerstehen zu können, müssen die Resonanzplatten Verstärkungen erhalten, die jedoch die Schwingungen der Platten nicht behindern dürfen. Die natürlichste dieser Verstärkungen besteht darin, dass man den Platten Formen gibt, so dass die angrenzenden Teile einander stützen. Dies geschieht durch bogenförmige Spannung der

Ist bei der Harfe die Resonanzplatte noch teilweise von einem Hohlraume umschlossen, so liegt die Resonanzplatte des Klaviers vollständig frei und gibt die von der Saite empfangenen Impulse unmittelbar an die Luft ab, wodurch sich die große Tonfülle dieser Instrumente erklärt.

Platten. Wo dieses Mittel nicht ausreicht, bildet die sog. Berippung eine weitere Verstärkung, die bei Streichinstrumenten nur in der Richtung der Holzfaser (man nennt eine solche Rippe den Basssteg), bei Klavieren aber auch quer zur Faserrichtung angewendet wird.

Frage 981. Aus welchen Tatsachen geht hervor, dass die Resonanz wohl sehr nahe mit dem Mittönen verwandt, aber keineswegs mit demselben identisch ist?

Erkl. 909. Die Resonanz ist weit wichtiger als das Mittönen, indem auf ihr allein die Möglichkeit beruht, gespannte Saiten in der Musik überhaupt, und zugleich in einer solchen Vollendung zu verwenden, dass sie als Tonerreger allen andern vorangehen. Auch die Töne gespannter Membranen, Stäbe und Zungen müssen durch Resonanz verstärkt werden. Die Maultrommel ist z. B. ganz tonlos, so lange sie nicht mit der als Resonatorraum wirkenden Mundhöhle in Verbindung gebracht wird. Durch Erweiterungen oder Verengerungen dieses Resonanzraumes entstehen Tonfolgen, welche den Obertönen des Grundtones dieses Instruments entsprechen.

Bei unserem eigenen Stimmorgane ist es die Zunge und die Resonanzhöhle des Mundes, welche ihre Form so verändern kann, dass sie sowohl auf den Grundton der Stimmbänder, wie auf jeden ihrer Obertöne resoniert. Mittelst veränderter Stellung des Mundes können wir also den Grundton und die Obertöne der Stimme in verschiedener Stärke zusammenmischen, wodurch die verschiedenen Vokalklänge entstehen.

Telephon und Phonograph beweisen, dass nicht nur feine Membranen, sondern auch starre Platten alle an sie anstoßenden Schwingungen aufneh-

Antwort. Dies geht schon daraus hervor, dass Resonanzböden in demselben Augenblicke schweigen, in welchem der Tonerreger verstummt, während der mittönende Körper in diesem Falle forttönt. Ferner resoniert ein Resonanzboden für alle Töne, während der mittönende Körper für seine Töne absolut genau gestimmt sein muß und nur diese verstärkt.

Nach Weber schwingen die Teilchen eines mittönenden Körpers weiter, weil ihnen der mitgeteilte Ton natürlich ist, indem der Körper darauf abgestimmt ist; bei resonierenden Körpern aber, deren Teilchen ein bestimmter Ton aufgezwungen wird, hört jede Schwingung sogleich auf, dauert also nur so lange fort, als die tonerregenden Schwingungen anhalten und anregen. Durch diese fortwährend erregten Schwingungen entstehen fortschreitende Wellen, die an den Grenzen nur unvollständig reflektiert und daher von neuen fortschreitenden Wellen aufgehoben werden, ohne diese selbst aufheben zu können; dadurch ist die Bildung neuer reflektierter Wellen möglich, die bei der Rückkehr dasselbe Schicksal haben, aber doch immer neuen Wellen Platz machen, so lange die Tonerregung fortdauert.

men, um die gegen sie gesandten Töne oder Klänge entweder an einem entfernten Orte oder auch am Orte der Entstehung des Klanges zu reproduzieren.

Frage 982. Wodurch unterscheiden sich die durch die Knotenlinien resonierender Körper entstehenden Resonanzfiguren von den Chladni'schen Klangfiguren?

Erkl. 910. Wenn der resonierende Körper sehr regelmäßig ist, z. B. eine Scheibe, der die Schwingungen in ihrer Mitte mitgeteilt werden, so können die Knotenlinien der Resonanz auch symmetrisch sein; es entsteht aber kein Mittönen, wenn die Zwischenräume zwischen den Knotenlinien nicht solche aliquote Teile der Scheibe sind, dass die Wellen, nachdem sie einen gewissen Weg zurückgelegt haben, bald in ihren vorigen Weg zurücklaufen, und dann den schon einmal gemachten Weg noch einmal wiederholen.

Antwort. 1) Die Chladni'schen Knotenlinien liegen immer symmetrisch (S. Seite 98 u. f. II. Bd. der Akustik), die Knotenlinien der Resonanz können auch ganz unsymmetrisch liegen.

2) Die Zwischenräume zwischen den Chladni'schen Knotenlinien sind aliquote Teile des Raumes von einem Rande des tönenden Körpers zum andern, was bei den Resonanzfiguren nicht der Fall ist.

3) Bei den Chladni'schen Klangfiguren nimmt die Höhe des Tones mit der Anzahl der Knotenlinien zu, während sich bei den Resonanzfiguren dieses Verhältnis nicht zeigt.

Frage 983. Verschieden vom Mittönen und der Resonanz, aber mit beiden verwandt, ist die Erregung der harmonischen Untertöne (Auerbach 1878), deren Schwingungszahl ½, ⅓, ¼ usw. von der Schwingungszahl eines Grundtones ist. In welcher Weise lassen sich diese harmonischen Untertöne vorführen?

Erkl. 911. Die deutschen Violinkästen, die in dieser Beziehung untersucht wurden, brachten fast alle solche Untertöne hervor, die italienischen dagegen nicht. Zur Erklärung dieser Erscheinung wird angeführt, dass z. B. eine Resonanzholzplatte unvollkommen elastisch und zähe sei und deshalb den Bewegungen der aufgesetzten Stimm-

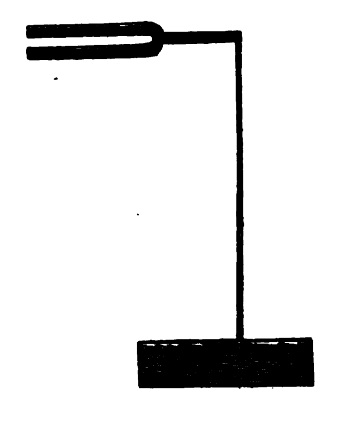
Antwort. Wir setzen eine stark angeschlagene Stimmgabel so auf eine Tischplatte, dass eine möglichst leise Berührung stattfindet, und hören in der Ferne die tiefere Oktave; mit gewissen Materialien gelingt es auch, die Unterquinte der tieferen Oktave, die zweite tiefere Oktave usw. herzustellen. Die meisten Stoffe geben, auf diese Weise erregt, Untertöne, andere wenige (wie Glas und Blech) nur Geräusche; dünne polierte Platten der Bergtanne erzeugen immer den Ton der Stimmgabel allein.

gabel wohl nach unten, aber nicht augenblicklich nach oben folgen könne; die nächste Schwingung der Stimmgabel trifft daher das Holz nicht, wohl aber eine der folgenden Schwingungen, so dass die Platte 2-, 3-, 4-mal weniger Schwingungen vollbringt als die Gabel.

Frage 984. Was haben wir unter derjenigen Erscheinung zu verstehen, die Wheatstone (1823) mit dem Namen P o l a r i s a t i o n d e s S c h a l l e s bezeichnete?

Antwort. Wird eine Stimmgabel mit ihrem Stiele rechtwinklig auf das Ende eines langen geraden Drahtes (oder Stabes) gestellt, der auf einem Resonanzboden steht, so werden die Schwingungen derselben durch den Draht dem Boden leicht mitgeteilt, wenn die Zinken der Gabel mit der Achse des Drahtes in einerlei Ebene liegen (Fig. 520), nicht aber, wenn die Achse des Drahtes auf der Ebene der Zinken senkrecht steht (d. h. beide Zinken in einer Horizontalebene liegen). Beim allmählichen Drehen der Stimmgabel aus einer Lage in die andere, nimmt der Ton während einer vollen Umdrehung zweimal ab und eben so oft zu. Biegt man den Draht in dem Augenblicke, wo die auf demselben stehende Gabel am stärksten tönt, so nimmt die Tonstärke ab und ist am geringsten, wenn der Draht unter einem rechten Winkel gebogen ist. (S. Fig. 521 a b c). Hierauf nimmt sie bei weiterem Biegen des Drahtes wieder zu und erreicht ihr Maximum, sobald beide Drahtstücke wieder parallel sind. (S. a m n c in Fig. 521.)

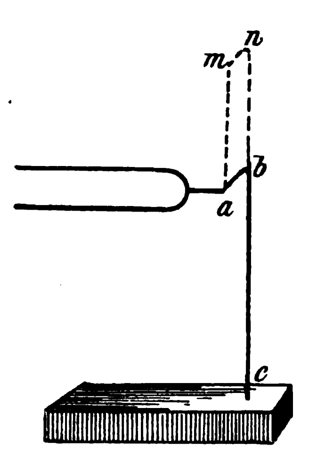
Fig. 520.



Frage 985. Wodurch erklärt sich diese Erscheinung?

Antwort. Diese Erscheinung erklärt sich durch den Umstand, dass die transversalen Schwingungen eines tönenden festen Körpers sich einem andern flächenförmigen Körper, durch einen zwischen beide Körper gebrachten

Fig. 521.



Stab desto schwächer mitteilen, je mehr die durch den verbindenden Stab fortschreitende Schallwelle eine Bewegung der Teilchen bedingt, deren Richtung auf der Richtung der Welle senkrecht steht. Je öfter und bedeutender die Richtung, in welcher die Teilchen schwingen, wechselt, desto mehr wird die Mitteilung des Tones gehemmt.

Die Stimmgabel kann nun einem Körper den sie berührt, Schwingungen mitteilten, entweder

a) durch die sehr feinen Erzitterungen der einzelnen Teile des Gabelstiels, die immer parallel zu den Schwingungen der Gabelzinken stattfinden, und

b) durch eine Bewegung, die dem ganzen Stiele abwechselnd nach auf- und abwärts mitgeteilt wird. Die von Wheatstone hervorgehobene Erscheinung bezieht sich auf die erste Art der Bewegung, indem der Ton durch die den Zinken parallelen feinen Schwingungen fortgepflanzt wird.

J. Gelöste Aufgaben.

Aufgabe 185. Wenn zwischen einem Blitze und dem Beginn des Donners ein Zeitraum von 30 Sekunden liegt, wie weit ist dann das Gewitter entfernt? (c sei 340 m).

Auflösung. Nach der auf Seite 3 gegebenen Formel

$$c = s/t$$

ist der Weg $s = ct$, oder die entsprechenden Zahlenwerte eingesetzt:

$$s = 30 \,.\, 340$$

oder $$s = 10200 \text{ m}.$$

Aufgabe 186. In welcher Zeit würde der Schall im lufterfüllten Raume bei 331,2 m sekundlicher Geschwindigkeit einen Weg gleich dem Abstande zwischen Erde und Mond von 51 800 geographischen Meilen (zu je 7420,44 m) zurücklegen?

Auflösung. Nach der obigen Formel ist die Zeit

$$t = s/c,$$

oder für den vorliegenden Fall ist

$$t = \frac{51800 \cdot 7420,44}{331,2}$$

oder

$$t = 1160600 \text{ Sekunden}$$

oder

13 Tage 10 Stunden $23\frac{1}{3}$ Min.

Aufgabe 187. Wenn aber der Schall zum Durchlaufen desselben Weges im wasserstofferfüllten Raume 3 Tage 10 Stunden 24 Min. und 20 Sek. gebraucht, wie groß ist dann die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Wasserstoff?

Hilfsrechnung:

$$\begin{aligned} \log 51800 &= 4{,}71433 \\ + \log 7420{,}44 &= 3{,}87043 \\ & 8{,}58476 \\ - \log 303860 &= 5{,}48267 \\ & 3{,}10209 \\ \text{num log } & 1265. \end{aligned}$$

Auflösung. Nach der oben benutzten Formel ist die Geschwindigkeit

$$c = s/t$$

oder

$$c = \frac{51800 \cdot 7420{,}44}{303860}, \text{ was,}$$

da die Zeit in Sekunden ausgedrückt, $t = 303860$ ergibt. Nach nebenstehender Hilfsrechnung ist

$$c = 1265 \text{ m.}$$

Aufgabe 188. Wie ändert sich die Zahl der Schwingungen vom Grundtone einer offenen $1\frac{1}{2}$ m langen Orgelpfeife, wenn die Temperatur von 6^0 Grad auf 18^0 steigt und die Schallgeschwindigkeit bei 0^0 332,4 m beträgt?

Hilfsrechnung 1:

$$c_1 = 332{,}4 \,.\, \sqrt{1{,}022.}$$

$$c_2 = 332{,}4 \,.\, \sqrt{1{,}066.}$$

$$\begin{aligned} \log 1{,}022 &= 0{,}00945 \,.\, \tfrac{1}{2} \\ & 0{,}00472 \\ + \log 332{,}4 &= 2{,}52166 \\ & 2{,}52638 \\ \text{num log } c_1 &= 336{,}3 \text{ m.} \end{aligned}$$

Hilfsrechnung 2:

$$\begin{aligned} \log 1{,}066 &= 0{,}02776 \,.\, \tfrac{1}{2} \\ & 0{,}01388 \\ + \log 332{,}4 &= 2{,}52166 \\ & 2{,}53554 \\ \text{num log } c_2 &= 343{,}2 \text{ m.} \end{aligned}$$

Auflösung. Beträgt die Schallgeschwindigkeit bei 0^0 332,4 m, so ist die Schwingungszahl der offenen Orgelpfeife bei dieser Temperatur nach Formel

$$N_0 = c/2l$$

(II. Bd. der Akustik, Seite 200)

$$N_0 = \frac{332{,}4}{2 \cdot 1\frac{1}{2}}$$

oder

$$N_0 = 110{,}8.$$

Nach der Formel auf Seite 10 ist bei 6^0 resp. 18^0 Temperatur die Schallgeschwindigkeit

$$c_1 = 332{,}4 \sqrt{1 + 0{,}003665 \cdot 6}$$

oder

$$c_1 = 336{,}3 \text{ m}$$

und bei 18^0 ist

$$c_2 = 332{,}4 \sqrt{1 + 0{,}003665 \,.\, 18}$$

oder

$$c_2 = 343{,}2 \text{ m,}$$

demnach steigt die Schwingungszahl bei 6^0 auf

$$N_1 = \frac{336,3}{3} = 112,1$$

und bei 18^0 auf

$$N_2 = \frac{343,2}{3} = 114,4.$$

Aufgabe 189. Wie groß ist die Temperatur der Luft, wenn die Schallgeschwindigkeit an einem heißen Sommertage 350 m beträgt?

Auflösung. Bezeichnen wir die unbekannte Temperatur mit x, so ist unter Einsetzung der gegebenen Werte in die Gleichung Seite 10:

$$350 = 332,4 \sqrt{1 + 0,003665\, x}$$

woraus

$$x = \frac{\left(\frac{350}{332,4}\right)^2 - 1}{0,003665}$$

oder nach nebenstehender Hilfsrechnung:

$$x = 29,74^0\ C.$$

Hilfsrechnung:

$$\begin{aligned} \log 350 &= 2,54407 \\ -\log 332,4 &= 2,52166 \\ & \quad 0,02241 \cdot 2 \\ & \quad 0,04482 \end{aligned}$$

$$\text{num} \log 1,109 - 1 = 0,109.$$

$$x = \frac{109}{3,665};$$

$$\begin{aligned} \log 109 &= 2,03743 \\ \log 3,665 &= 0,56407 \\ & \quad 1,47336 \\ x &= 29,74. \end{aligned}$$

Aufgabe 190. Eine Pfeife gibt bei einer Lufttemperatur von 15^0 nach der Potenzstimmung den Ton $C = 64$ Schwingungen; wie groß muß die Temperatur sein, damit sie die große Terz dieses Tones gibt?

Auflösung. Nach Lösung der Aufgabe 188 ist

$$N_1 = \frac{c_1}{2l} \text{ und } N_2 = \frac{c_2}{2l}$$

oder $N_1 : N_2 = c_1 : c_2.$

Nach Seite 9 ist aber

$$c_1 : c_2 = \sqrt{1 + at_1} : \sqrt{1 + at_2}$$

oder

$$N_1 : N_2 = \sqrt{1 + at_1} : \sqrt{1 + at_2}$$

oder $\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \frac{1 + at_1}{1 + at_2}$

woraus die gesuchte

$$t_2 = \frac{\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \cdot (1 + at_1) - 1}{a}$$

oder die entsprechenden Zahlenwerte eingesetzt

$$t_2 = \left(\frac{5}{4}\right)^2 \cdot \frac{(1 + 0,003665 \cdot 15) - 1}{0,003665}$$

oder $t_2 = 177^0.$

Hilfsrechnung:

$$t_2 = \frac{\frac{25}{16} \cdot 1,055 - 1}{0,003665}$$

oder

$$t_2 = \frac{649}{3,665};$$

$$\begin{aligned} \log 649 &= 2,81224 \\ -\log 3,665 &= 0,56407 \\ \log t_2 &= 2,24817 \\ t_2 &= 177^0. \end{aligned}$$

Aufgabe 191. Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines dreigestrichenen ais = 1843 Schwingungen, in einer offenen Röhre von $3\frac{1}{2}$ mm Durchmesser 308 m beträgt, während in freier Luft $c = 332{,}4$ m ist, wie groß ist dann der Reibungskoeffizient zwischen Gas- und Röhrenwand?

Erkl. 912. Bei strömenden und schwingenden Bewegungen der Gase in Röhren findet eine Reibung an den Röhrenwänden, sowie der schneller strömenden inneren Schichten an den langsamer bewegten äußeren statt. An den Röhrenwänden haftet eine dünne Gasschicht, an welcher sich die folgende bewegte Schicht reibt. Berühren sich zwei bewegte Gasschichten von verschiedener Geschwindigkeit in einer ebenen Trennungsfläche, so wird die schneller bewegte Schicht verzögert, die langsamer bewegte beschleunigt, und die Größe der Reibung wird durch den Druck gemessen, der für sich allein jene Verzögerung hervorzubringen imstande ist. Die Reibung ist direkt proportional der Größe der Berührungsflächen und der Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Schichten, außerdem hängt sie von der materiellen Beschaffenheit der Gase ab und wird durch einen Koeffizienten η ausgedrückt.

Auflösung. Aus der v. Helmholtzschen Formel (s. Seite 17):

$$U = c\left(1 - \frac{\eta}{2\,R\,\sqrt{\pi\,N}}\right)$$

ergibt sich für die gesuchte Größe

$$\eta = 2\,R\,\sqrt{\pi\,N}\left(1 - \frac{U}{c}\right)$$

oder die entsprechenden Zahlenwerte eingesetzt

$$\eta = 0{,}0035 \cdot \sqrt{\pi \cdot 1843}\left(1 - \frac{308}{332{,}4}\right)$$

oder

$$\eta = 0{,}0035 \cdot 76{,}1\,(1 - 0{,}9266)$$

oder

$$\eta = 0{,}0035 \cdot 76{,}1 \cdot 0{,}0734$$

oder

$$\eta = 0{,}0195,$$

d. h., die verzögernde Kraft, welche eine Schicht von 1 qcm Oberfläche ausübt, wenn die Geschwindigkeit derselben um 1 cm geringer ist, als die einer um 1 cm entfernten Schicht, beträgt

0,0195 g oder 19,5 mg.

Aufgabe 192. Wie groß ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles bei 748 mm Barometerstand in einem mit Wasserdampf gesättigten Raume von 15° C

a) ohne

b) mit Rücksicht auf den Feuchtigkeitsgehalt, wenn die Schallgeschwindigkeit bei 0° und trockener Luft $c = 332{,}4$ m gesetzt wird?

Auflösung. a) Nach Formel Seite 10 ist ohne Rücksicht auf den Feuchtigkeitsgehalt die Schallgeschwindigkeit bei 15° C

$$c = 332{,}4\,\sqrt{1 + 0{,}003665 \cdot 15}$$

oder

$$c = 332{,}4\,\sqrt{1{,}055}$$

oder

$$c = 341{,}2 \text{ m.}$$

b) Nach Formel Seite 18 ist aber mit Rücksicht auf den Feuchtigkeits-

Hilfsrechnung 1:

$$\log 1{,}055 = 0{,}02325 \cdot {}^1/_2$$
$$0{,}01162$$
$$+ \log 332{,}4 = 2{,}52166$$
$$2{,}53328.$$

Hilfsrechnung 2:

$$c = 332{,}4 \cdot \sqrt{\frac{1{,}055}{1 - 0{,}00645}}$$

oder

$$c = 332{,}4 \sqrt{\frac{1{,}055}{0{,}9935}}$$

$$\log 1{,}055 = 0{,}02325$$
$$- \log 0{,}9935 = 0{,}99717 - 1$$
$$0{,}02608 \cdot {}^1/_2$$
$$0{,}01304$$
$$+ \log 332{,}4 = 2{,}52166$$
$$\log c \doteq 2{,}53470$$
$$c = 342{,}5.$$

gehalt die Geschwindigkeit in feuchter Luft

$$c = c_0 \sqrt{\frac{1 + a\,t}{1 - 0{,}38\,\frac{f}{H}}}$$

oder

$$c = 332{,}4 \sqrt{\frac{1 + 0{,}003665 \cdot 15}{1 - 0{,}38 \cdot \frac{12{,}7}{748}}}$$

denn, wie sich aus der Tabelle über die Spannkraft des Wasserdampfs ergibt. (s Lehrb. der Kalorik) ist bei 15° C $f = 12{,}7$ mm, d. h. die Spannkraft des Wasserdampfs entspricht dem Drucke einer Quecksilbersäule von 12.7 mm Höhe. Nach nebenstehender Hilfsrechnung ist

$$c = 342{,}5 \text{ m.}$$

Aufgabe 193. Eine Pfeife gibt beim Anblasen in der atmosphärischen Luft den Ton $c = 129{,}3$ Schwingungen. Welche Töne nach der temperierten Stimmung wird sie geben, wenn sie mit Wasserstoff ($s = 0{,}0693$) oder mit Kohlensäure ($s = 1{,}529$) gefüllt ist

a) ohne

b) mit Rücksicht auf die Koeffizienten k und k_1 der spez. Wärmen?

Hilfsrechnung 1:

$$\log 129{,}3 = 2{,}11160$$
$$- \log \sqrt{0{,}0693} = 0{,}42036 - 1$$
$$\log n = 2{,}69124.$$

Hilfsrechnung 2:

$$\log 129{,}3 = 2{,}11160$$
$$- \log \sqrt{1{,}529} = -0{,}09220$$
$$\log n = 2{,}01940.$$

Auflösung. Nach Formel auf Seite 19 ist

$$c = c_1 \sqrt{\frac{k}{k_1\, s}}$$

oder ohne Rücksicht auf k/k_1 ist

$$c = c_1 \sqrt{\frac{1}{s}}$$

oder da das Verhältnis der Schwingungszahlen $n : n_1 = c : c_1$, so können wir auch setzen

$$n = n_1 \sqrt{\frac{1}{s_1}}$$

oder

$$n = n_1 \frac{n_1}{\sqrt{s_1}}.$$

Somit ist für Wasserstoff

$$n = 129{,}3 : \sqrt{0{,}0693}$$

oder

$$n = 491$$

Schwingungen, was nach der temperierten Stimmung dem Tone h[1] (= 488,3) entspricht.

Hilfsrechnung 3:

$$\begin{aligned} \log 1{,}368 &= 0{,}13609 \\ -\log 1{,}395 &= -0{,}14457 \\ &\quad 1{,}99152 - 2 \,.\, {}^1/_2 \\ &\quad 0{,}99576 - 1 \\ +\log 104{,}6 &= 2{,}01940 \\ \log n_1 &= 2{,}01516. \end{aligned}$$

Für Kohlensäure ist

$$n = 129{,}3 : \sqrt{1{,}529}$$

oder

$$n = 104{,}6 \text{ Schwingungen,}$$

entsprechend dem *Gis* (= 102,6).

b) Da (nach Tabelle auf Seite 19) Wasserstoff denselben Wert für den Koeffizienten k hat, wie die atmosphärische Luft, so ändert sich unter Berücksichtigung derselben das Resultat für Wasserstoff nicht. Nach derselben Tabelle ist für Kohlensäure die oben ermittelte Schwingungszahl noch mit

$$\sqrt{k/k_1}$$

oder

$$\sqrt{\frac{1{,}368}{1{,}395}}$$

zu multiplizieren, also ist

$$n_1 = 103{,}6 \text{ Schwingungen.}$$

Aufgabe 194. Wie groß ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles

a) im Wasserdampf, dessen Dichte nahezu für alle Temperaturen = 0,6235 beträgt,

b) im Quecksilberdampf von 357°, dessen Dichte 6,98 beträgt, wenn wir die Schallgeschwindigkeit in der atmosphärischen Luft bei 0° gleich 1 setzen?

Hilfsrechnung 1:

$$\begin{aligned} \log 0{,}6235 &= 1{,}79484 - 2 \,.\, {}^1/_2 \\ &= 0{,}89742 - 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &1{,}0000 \\ -&0{,}89742 \\ \log c = &0{,}10258. \end{aligned}$$

Hilfsrechnung 2:

$$1 + 0{,}003665 \,.\, 357 = 2{,}308$$

$$c = 1 \,.\, \sqrt{\frac{2{,}308}{6{,}98}}$$

oder

$$\begin{aligned} \log 2{,}308 &= 0{,}36324 \\ -6{,}98 &= -0{,}84386 \\ {}^1/_2 &\,.\, 0{,}51938 - 1 \\ \log c &= 0{,}75969 - 1 \\ +332{,}4 &= 2{,}52166 \\ &\quad 2{,}28135. \end{aligned}$$

Auflösung. a) In analoger Weise wie bei der Lösung der vorigen Aufgabe erhalten wir für

$$c = c_1 : \sqrt{s}$$

oder

$$c = 1 : \sqrt{0{,}6235}$$

oder $c = 1{,}266$, d. h. wenn die Schallgeschwindigkeit in der atmosphärischen Luft 1 . 332,4 m = 332,4 m beträgt, so beträgt dieselbe im Wasserdampf

$$1{,}266 \,.\, 332{,}4 = 421 \text{ m.}$$

b) Unter Berücksichtigung der Temperatur erhalten wir an der Hand der ebenbenutzten, sowie der Formel 6 Seite 10 für Quecksilberdampf

$$c = 1 \,.\, \sqrt{\frac{1 + 0{,}003665 \,.\, 357}{6{,}98}}$$

oder

$$c = 0{,}575$$

oder

$$c = 0{,}575 \,.\, 332{,}4 \text{ m}$$

oder

$$c = 191 \text{ m.}$$

Aufgabe 195. Wie groß ist das spezifische Gewicht des Leuchtgases, wenn in demselben bei 0° C die Schallgeschwindigkeit 416 m beträgt?

Hilfsrechnung:

$$\begin{aligned} \log 332{,}4 &= 2{,}52166 \\ -\log 416 &= -2{,}61909 \\ & \quad 2 \,.\, 0{,}90257 - 1 \\ \log s &= 0{,}80514 - 1. \end{aligned}$$

Auflösung. Aus der in Lösung der vorigen Aufgabe benutzten Formel erhalten wir für die gesuchte Größe

$$s = \left(\frac{c_1}{c}\right)^2$$

oder

$$s = \left(\frac{332{,}4}{416}\right)^2$$

oder

$$s = 0{,}6385.$$

Aufgabe 196. Eine 60 cm lange gedeckte Pfeife gibt bei 15° C mit Wasserstoff angeblasen einen Grundton von der Schwingungszahl 527. Wie berechnet sich hieraus das spezifische Gewicht des Wasserstoffs?

Hilfsrechnung:

$$\begin{aligned} \log 142{,}25 &= 2{,}15305 \\ -527 &= 2{,}72181 \\ & \quad 0{,}43124 - 1 \,.\, 2 \\ & \quad 0{,}86248 - 2 \\ & \quad 0{,}07286. \end{aligned}$$

Auflösung. Bei 15° C ist die Schallgeschwindigkeit in der Luft

$$c = 332{,}4 \sqrt{1 + 0{,}003665 \,.\, 15}$$

oder

$$c = 332{,}4 \sqrt{1{,}055}$$

oder $c = 341{,}4$ m.

Eine 60 cm lange gedeckte Orgelpfeife gibt demnach nach Formel

$$N = c/4\,l$$

(II. Bd. der Akustik S. 202.)

$$N = 341{,}4/40{,}6$$

oder

$$N = 142\tfrac{1}{4}.$$

Analog der Auflösung der Aufgabe 195 ist (da $n : n_1 = c : c_1$) das gesuchte spezifische Gewicht

$$s = \left(\frac{n_1}{n}\right)^2$$

oder

$$s = \left(\frac{142{,}25}{527}\right)^2$$

oder

$$s = 0{,}07286.$$

Aufgabe 197. Wie groß ist die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen in folgenden Flüssigkeiten, für welche die Kompressibilität, d. i. die Verminderung des Volumens 1 durch den Druck einer Atmosphäre (= 0,76 . 13,59 = 10,33 m Wassersäule) sowie das spezifische Gewicht gegeben ist?

Auflösung. An der Hand der Formel Seite 41

$$\sqrt{\frac{E}{d}} \text{ oder}$$

$$\sqrt{\frac{1^{at}}{\lambda\, s/g}} = \sqrt{\frac{1^{at} \cdot g}{\lambda\, s}} = c$$

erhalten wir:

	s	λ
Absol. Alkohol	0,7960	0,0000947
Terpentinöl . .	0,8622	0,0000800
Schwefeläther .	0,7529	0,0001002.

Hilfsrechnung 1:

log 10,33 = 1,01403
log 9,81 = 0,99167
2,00570 (num log = 101,3).

log 0,7960 = 0,90091 − 1
log 0,0000947 = 0,97635 − 5
0,87726 − 5

log 2,00570
− log 0,87726 − 5
6,12844 . 1/2
log c = 3,06422.

Hilfsrechnung 2:

log 0,8622 = 0,93561 − 1
log 0,00008 = 0,90309 − 5
0,83870 − 5

log 101,3 (s. oben) = 2,00570
− 0,83870 − 5
6,16700 . 1/2
log c = 3,08355.

Hilfsrechnung 3:

log 0,7529 = 0,87674 − 1
log 0,0001002 = 0,00087 − 4
0,87761 − 5

log 101,3 = 2,00570
− 0,87761 − 5
6,12809 . 1/2
log c = 3,06404.

Erkl. 913. Bei Flüssigkeiten bedeutet E den Druck in Kilogrammen, welchen man auf die Oberfläche einer in einem prismatischen, vollkommen unausdehnbaren Gefäße von beliebigem Querschnitte g enthaltenen Flüssigkeitsschicht von 1 m Höhe wirken lassen müßte, um die Flüssigkeit bis zum Volumen Null zusammenzudrücken. Wenn man als Einheit des Druckes den einer Atmosphäre (= 1^{at}) annimmt, welcher auf 1 qcm Oberfläche = 1,003 kg oder einer 10,33 m hohen Wassersäule gleich ist, so wird der absolute Alkohol um 94,7 Millionstel seines ursprünglichen Volumens zusammengepreßt, d. h., es

a) für absoluten Alkohol

$$c = \sqrt{\frac{10,33 \cdot 9,81}{0,7960 \cdot 0,0000947}}$$

oder

$$c = \mathbf{1160\ m.}$$

b) für Terpentinöl: (s. Hilfsrechn. 1.)

$$c = \sqrt{\frac{101,3}{0,8622 \cdot 0,00008}}$$

oder

$$c = \mathbf{1212\ m.}$$

c) für Schwefeläther:

$$c = \sqrt{\frac{101,3}{0,7529 \cdot 0,0001002}}$$

oder

$$c = \mathbf{1159.}$$

Vergleiche diese Resultate mit der Tabelle auf Seite 46.

würde auf eine Flüssigkeitsschicht von 1 m Höhe und 1 qcm Oberfläche ein Druck von

$$\frac{1}{0,0000947} = \frac{10000000}{947} = 10560 \text{ kg}$$

wirken müssen, um die Flüssigkeit bis zum Volumen „Null" zusammenzupressen. E ist also hier

$$1 at \;.\; 10560$$

oder

$$\frac{1\,at}{0,0000947},$$

d ist das Gewicht der genannten Flüssigkeitsschicht in kg; dividiert durch die Beschleunigung der Schwere oder

$$d = s/g \text{ oder } s/9,81.$$

Aufgabe 198. Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Quecksilber 1461 m und das spezifische Gewicht dieser Flüssigkeit 13,59 beträgt

a) wie groß wird demnach die Kompressibilität derselben sein?

b) wie groß ist der Elastizitätsmodul des Quecksilbers?

Hilfsrechnung:

$$\begin{aligned}
\log 1461^2 &= 3,16465 \;.\; 2 \\
&\quad\;\, 6,32930 \\
+ \log 13,59 &= 1,13322 \\
&\quad\;\, 7,46252 \\
\log 101,3 &= 2,00570 \\
&\quad - 7,46252 \\
\log \lambda &= 0,54318 - 6 \\
&\quad \log 6,00000 \\
&\quad - 0,54318 \\
\log E &= 5,45682.
\end{aligned}$$

Auflösung. a) Aus der in der vorigen Lösung benutzten Formel

$$c = \sqrt{\frac{101,3}{s \cdot \lambda}}$$

erhalten wir für die unbekannte Größe

$$\lambda = \frac{101,3}{c^2 \cdot s}$$

oder für den vorliegenden Fall

$$\lambda = \frac{101,3}{1461^2 \cdot 13,59}$$

oder

$$\lambda = \mathbf{0,00000349}.$$

b) Hiernach ist der Elastizitätsmodul von Quecksilber

$$E = \frac{1}{0,00000338}$$

oder

$$E = \mathbf{286300\ kg}.$$

Aufgabe 199. Wenn eine Flüssigkeitssäule in einer offenen Orgelpfeife tönende Schwingungen macht, so ist die Schwingungszahl ihres Grundtones bekanntlich $\frac{c}{2\,l}$ worin c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Longitudinalwellen in der Flüssigkeit bedeutet.

Auflösung. Nach der Formel

$$n = c/2\,l$$

(s. S. 200 II. Bd.), erhalten wir

$$n = \frac{1286 \cdot \sqrt{0,6667}}{2 \cdot 0,25}$$

Wenn nun diese Geschwindigkeit in Röhren nur $\sqrt{2/3}$ Mal so groß ist, als in der unbegrenzten Flüssigkeit, wieviel Schwingungen macht dann der Grundton pro Sekunde, wenn die Länge der Orgelpfeife 25 cm beträgt und dieselbe durch Alkohol von 36° B und 20° Temperatur angeblasen wird? ($c = 1286$ m).

$$\begin{aligned} \log \sqrt{2/3} &= 1{,}82393 - 2 \cdot 1/2 \\ & 0{,}91196 - 1 \\ + \log 1286 &= 3{,}10924 \\ & 3{,}02120 \\ - \log 0{,}5 &= 0{,}69897 - 1 \\ \log n &= 3{,}32223 \\ n &= \mathbf{2100}, \end{aligned}$$

was einem etwas hohen c^4 entspricht.

Aufgabe 200. Welchen Ton erhält man durch die Längsschwingungen eines 1,2 m langen, an beiden Enden freien Eichenholzstabes, je nachdem dieser Stab der Länge nach, oder radial, oder tangential aus dem Holzblock geschnitten ist? (Die bezüglichen Geschwindigkeiten sind aus der Tabelle auf Seite 54 zu entnehmen.)

Auflösung. Nach Formel XVI) II. Band ist

$$n = \frac{1}{2\,l}\sqrt{E/d} \text{ oder } n = \frac{c}{2\,l},$$

also

$$\text{a) } n = \frac{3850}{2{,}4} = 1604$$

$$\text{b) } n = \frac{1571}{2{,}4} = 654{,}5$$

$$\text{c) } n = \frac{1119}{2{,}4} = 466$$

ungefähr den Tönen

gis^3, e^2 und ais^1

entsprechend.

Aufgabe 201. Ein in der Mitte gehaltener Silberstab von 32 cm Länge gibt, wenn man ihn an einem Ende reibt, das $d^5 = 4645$ Schwingungen; wie groß ist hiernach die Geschwindigkeit des Schalles im Silber, und wie groß ist sein Elastizitätsmodulus, wenn das spezifische Gewicht $s = 10{,}5$ gesetzt wird?

Auflösung. Wie schon in der vorigen Lösung bemerkt wurde ist

a) $$n = c/2l$$

also

$$c = 2\,ln$$

oder

$$c = 2 \cdot 0{,}32 \cdot 4645$$

oder

$$c = 2973 \text{ m.}$$

b) da $$c = \sqrt{E/d}$$

oder

$$c = \sqrt{\frac{Eg}{s}}$$

so ist

$$E = \frac{c^2 \cdot s}{g}$$

oder in cm

$$E = \frac{297300^2 \cdot 10,5}{10^5 \cdot 981}$$

oder

$$E = 9460.$$

Aufgabe 202. Wie ändert sich die Tonhöhe eines in seiner Mitte festgeklemmten Messingstabes von 45 cm Länge, wenn derselbe von 20° auf 100° und 200° erwärmt wird? (Siehe Tab. Seite 55.)

Auflösung. Die Geschwindigkeit des Schalles ist im Kupfer 3558 resp. 3295 und 2950 m. Demnach gibt der Stab bei 20° (nach der Formel $n = c/2\,l$)

$$n = \frac{3558}{0,9} = 3953 \text{ Schwingungen,}$$

bei 100°

$$n = \frac{3295}{0,9} = 3661 \text{ Schwingungen}$$

und bei 200°

$$n = \frac{2950}{0,9} = 3278 \text{ Schwingungen.}$$

Der Ton geht demnach von einem etwas hohen h^4 auf ais^4 und gis^4 herunter.

Aufgabe 203. Welche Schallgeschwindigkeit hat

a) ein Silberstab von 10,47 spezifischem Gewicht und 7140 kg Elastizitätsmodul?

b) ein Kupferstab von 8,78 spezifischem Gewicht und 10 519 kg Elastizitätsmodul?

c) Wenn die Länge des in seiner Mitte befestigten Silberstabes 1000 mm beträgt, welchen Ton gibt er dann, wenn er an einem Ende gerieben wird?

d) Wie lang muß ein Kupferstab sein, wenn er denselben Ton wie der Silberstab geben soll?

e) Welchen Ton gibt ein 1000 mm langer Kupferstab und

f) wie lang muß ein Silberstab sein, wenn er denselben Grundton geben soll?

Auflösung. Nach der schon im II. Bande der Akustik angewandten Formel

$$c = \sqrt{\frac{Eg}{s}}$$

ist die Schallgeschwindigkeit in Zentimetern berechnet:

a) $$c = \sqrt{\frac{7140 \cdot 10^5 \cdot 981}{10,47}} \text{ oder}$$

$$c = \mathbf{2586\ m.}$$

b) Die Schallgeschwindigkeit im Kupferstabe ist

$$c = \sqrt{\frac{10519 \cdot 10^5 \cdot 981}{8,78}} \text{ oder}$$

$$c = \mathbf{3428\ m.}$$

Hilfsrechnung 1:

$$\begin{aligned} \log 7140 &= 3{,}85370 \\ \log 10^5 \cdot 981 &= 7{,}99167 \\ &\overline{11{,}84537} \\ -\log 10{,}47 &= 1{,}01995 \\ &\overline{10{,}82542 \cdot {}^1/_2 = 5{,}41271} \end{aligned}$$

258600 cm.

Hilfsrechnung 2:

$$\begin{aligned} \log 10519 &= 4{,}02198 \\ \log 10^5 \cdot 981 &= 7{,}99167 \\ &\overline{12{,}01365} \\ -\log 8{,}78 &= 0{,}94349 \\ &\overline{11{,}07016 \cdot {}^1/_2} \\ &\overline{5{,}53508} \end{aligned}$$

n log 342830 cm.

c) Nach der Formel

$$n = \frac{c}{2\,l}$$

ist

$$n = 2586 : 2$$

$$n = \mathbf{1296} \text{ Schwingungen}, = e^3.$$

d) Nach derselben Formel ist

$$l = \frac{c}{2\,n}$$

oder

$$l = \frac{3428}{2586},$$

das heißt $l = 1325$ mm Länge des Kupferstabes.

e) Ist dagegen der Kupferstab nur 1000 mm lang, so gibt er nach der Formel $n = c/2\,l$ die Schwingungszahl

$$n = \frac{3428}{2} = 1714$$

oder etwa a^3.

f) Soll ein Silberstab denselben Ton geben, so muß seine Länge

$$l = \frac{c}{2\,n}, \text{ d. h. } n = \frac{2586}{3428}$$

oder 754,4 mm betragen.

Aufgabe 204. Ein 1 m langer Stab von Erlenholz, welcher an einem Ende eingeklemmt ist und in longitudinale Schwingungen versetzt wird, gibt denselben Grundton wie eine gedeckte 7 cm lange Pfeife. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit in dieser Holzart?

Auflösung. Wir benutzen die für gedeckte Pfeifen aufgestellte Formel

$$n = c/4\,l.$$

Setzen wir $c = 340$ m, dann gibt eine gedeckte Pfeife von 7 cm

$$n = 34000/28$$

oder

$$n = 1214$$

Schwingungen (dis^3). Gibt ein Erlenholzstab von 1 m Länge denselben Ton, so ist die Schallgeschwindigkeit in demselben

$$c = 4\,l\,n$$

oder

$$c = 4 \cdot 1214$$

oder

$$c = \mathbf{4856} \text{ m.}$$

Aufgabe 205. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit im Stahle, wenn der tiefste Longitudinalton einer Stahlsaite um 4 Oktaven höher ist als der Grundton einer gleich langen offenen Pfeife?

Auflösung. Wenn der Ton der Stahlsaite um 4 Oktaven höher ist als der Ton einer gleichlangen Pfeife, so ist die Geschwindigkeit im Stahl 16mal ($=2^4$) so gross als in der atmosphärischen Luft, oder bei 15° ist

$$c = 340 \cdot 16 = \mathbf{5440\ m.}$$

Aufgabe 206. Es sei die Schallgeschwindigkeit bei 15° Lufttemperatur $c = 340$ m. Wie weit muß eine Echo gebende Wand von dem Rufenden entfernt sein, damit ein dreisilbiges Wort 2 Sekunden nach dem Ausrufen gehört wird, wenn der Rufende in der Sekunde 4 Silben spricht?

b) Wie weit muß unter denselben Vorbedingungen die Echo gebende Wand entfernt sein, wenn sofort nach dem Ausrufen der letzten Silbe die erste reflektierte Silbe das Ohr des Beobachters erreicht?

c) Wie gestaltet sich die allgemeine Formel, wenn beim Aussprechen von 10 Silben in der Sekunde ein m-silbiges Wort n Sekunden nach dem Ausrufe gehört wird?

d) Wenn dass gerufene Wort direkt nach dem Ausrufen der letzten Silbe gehört werden soll?

Auflösung. a) Sprechen wir 4 Silben in der Sekunde, so sind zum Aussprechen von 3 Silben $^3/_4$ Sekunden Zeit notwendig, und da der reflektierte Schall 2 Sekunden nach dem Ausrufen der letzten Silbe unser Ohr treffen soll, so beträgt die gesamte Zeit ($^3/_4 + 2$) Sekunden; in welcher der Schall $2^3/_4 \cdot 340$ m Weg zurückgelegt hat, folglich darf die Wand nur

$$\frac{340}{2}\,(2^3/_4)$$

oder

$$\frac{340 \cdot 11}{8} = 467^1/_8 \text{ m}$$

von dem Rufenden entfernt sein, dann ist der gesamte Weg $= 2 \cdot 467^1/_2$ oder 935 m, wozu

$$\frac{935}{340} \text{ oder } 2^3/_4$$

Sekunden notwendig sind.

b) Im zweiten Falle ist die notwendige Entfernung nur

$$d = \frac{340}{2} \cdot \frac{3}{4} \text{ oder } 127{,}5 \text{ m.}$$

c) Allgemein ist

$$d = \frac{c}{2}\left(\frac{m}{p} + n\right).$$

d) $d = \frac{c}{2}\,\frac{m}{p}$. Wie sich aus der obigen Berechnung ergibt.

Aufgabe 207. Zwei Beobachter A und B sind beide von einer geraden Wand gleich weit entfernt. Der Beobachter A spricht in $^1/_5$ Sekunde eine Silbe, welche der Beobachter B in der zweiten

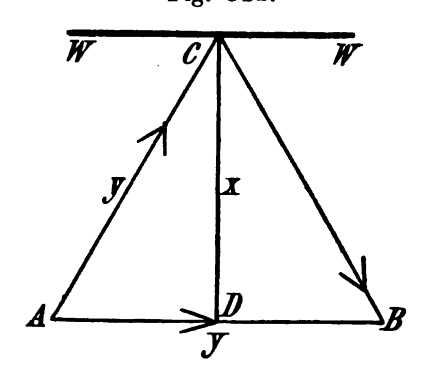
Auflösung. a) Wenn der Beobachter B nach Verlauf von $^1/_5$ Sekunde die von A gesprochene Silbe direkt hören soll, so müssen beide bei 340 m Schall-

$\frac{1}{5}$ Sekunde direkt und in der dritten $\frac{1}{5}$ Sekunde als Echo hört.

a) Wie weit stehen beide Beobachter von der Wand und voneinander ab, wenn die Geschwindigkeit des Schalles $c = 340$ m beträgt?

b) Wenn der Beobachter A ein fünfsilbiges Wort in einer Sekunde spricht, welches der Beobachter B in der zweiten Sekunde direkt und in der dritten Sekunde durch den reflektierten Schall hört, wie weit sind dann die beiden Beobachter von der Wand und voneinander entfernt?

Fig. 522.



geschwindigkeit 340 : 5 = 68 m voneinander entfernt sein. Bezeichnen wir also die Entfernung AB (siehe Figur 522) mit y, so ist $y = 68$ m. Von A aus nach der Wand und dann nach B soll der Schall den doppelt so großen Weg zurücklegen, folglich erhalten wir aus den drei Schallrichtungen ein gleichseitiges Dreieck, dessen Höhe x den gesuchten Abstand jedes Beobachters von der Wand bildet, und es ist nach dem Pythagorei'schen Lehrsatze im Dreieck ACD

$$x = \sqrt{y^2 - \left(\frac{1}{2}y\right)^2}$$

oder

$$x = \frac{y}{2}\sqrt{3}$$

oder

$$x = y/2 \cdot 1{,}732 = 0{,}866\, y;$$

somit ist die Entfernung jedes Beobachters von der Wand $x = 58{,}889$ m.

b) Soll der Schall in B erst nach Verlauf von einer Sekunde direkt gehört werden, so ist AB oder $y = 340$ m und $x = 294{,}44$ m.

Aufgabe 208. Ein Beobachter ruft gegen eine reflektierende Wand in einer Sekunde das Wort „A-si-nus" und hört durch das Echo das Wort „sinus"

a) Wie weit ist der Beobachter von der Wand entfernt?

b) Wie weit hat er sich der Wand genähert, wenn er nur die reflektierte Silbe „nus" hört? ($c = 336$ m.)

Auflösung. a) Da die reflektierte erste Silbe mit der direkten dritten Silbe zusammenfällt, so ist die Wand $\frac{1}{3}$. 336 = 112 m entfernt, so dass der Schall zur Wand und wieder zurück $\frac{2}{3}$ Sekunden Zeit gebraucht.

b) Nähert sich der Beobachter der Wand um $\frac{1}{2}$. 112 = 56 m, so braucht der Schall zur Wand und wieder zurück $\frac{1}{3}$ Sekunde Zeit, und es fällt die 1. und 2. reflektierte mit der 2. und 3. ankommenden Silbe zusammen, so daß nur die letzte Silbe rein zu hören ist.

Aufgabe 209. Ein Schallstrahl tritt aus Luft in Kohlensäure unter einem Winkel von 49° 50'; wenn nun die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des

Auflösung. Nach Formel auf S. 137.

$$\sin\alpha : \sin\beta = c : c^1$$

ist

Schalles in der Luft mit 1, und dieselbe in Kohlensäure mit 0,786 bezeichnet wird, wie groß ist dann der Brechungswinkel des Schallstrahls in Kohlensäure?

$$\sin \alpha = \sin 49^0 50' \cdot 0{,}786$$

oder

$$\alpha = \mathbf{36^0 55'},$$

denn

$$\begin{aligned} \log \sin 49^0 50' &= 9{,}88319 - 10 \\ - \log 0{,}786 &= 0{,}89542 - 1 \\ \hline \log \sin \alpha &= 9{,}77861 - 10. \end{aligned}$$

Aufgabe 210. Ein Schallstrahl tritt aus Ammoniak in atmosphärische Luft von 0°, deren Schallgeschwindigkeit $c = 332$ m beträgt. Wie groß ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Ammoniak, wenn der Einfallswinkel 41° und der Brechungswinkel 30° 22' beträgt?

Hilfsrechnung:

$$\begin{aligned} \log 332 &= 2{,}52114 \\ + \log \sin 41^0 &= 9{,}81694 \\ \hline & \quad 12{,}33808 \\ - \log \sin 30^0 22' &= 9{,}70375 \\ \hline & \quad 2{,}63433. \end{aligned}$$

Auflösung. Nach der vorigen Formel beträgt die Proportion:

$$\sin 41^0 : \sin 30^0 22' = x : 332$$

oder

$$x = \frac{332 \cdot \sin 41^0}{\sin 30^0 22'}$$

oder

$$x = \mathbf{430{,}8\ m.}$$

Aufgabe 211. Ein Schallstrahl tritt aus dampfförmigem in flüssigen Aethylalkohol; wenn nun die Schallgeschwindigkeit in ersterem 273, in letzterem 1160 m und der Brechungswinkel in der Flüssigkeit 60° beträgt, wie groß ist dann der Einfallswinkel?

Auflösung. Nach derselben Formel ist

$$\sin 60^0 : \sin x = 1160 : 273$$

woraus

$$x = \mathbf{11^0 46'},$$

denn

$$\begin{aligned} \log \sin 60^0 &= 9{,}93753 \\ + \log 273 &= 2{,}43616 \\ \hline & \quad 12{,}37369 \\ - \log 1160 &= 3{,}06446 \\ \hline \log \sin x &= 9{,}30923. \end{aligned}$$

Aufgabe 212. Ein Brunnen ist 100 m tief; nach wieviel Sekunden hört man einen Stein aufschlagen? ($c = 340$ m).

Hilfsrechnung:

$$\begin{aligned} \log 200 &= 2{,}30103 \\ \log 9{,}81 &= 0{,}99167 \\ \hline & \quad 1{,}30936 \cdot {}^1/_2 \\ \hline & \quad 0{,}65468 \end{aligned}$$

num log 4,515.

Auflösung. Nach Formel auf S. 126

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}} + \frac{s}{c}$$

oder

$$t = \sqrt{\frac{200}{9{,}81}} + \frac{100}{340}$$

oder $t = 4{,}5 + 0{,}3 =$ **4,8 Sekunden.**

Aufgabe 213. Man läßt einen Stein in eine Grube fallen und hört ihn nach 10 Sekunden aufschlagen, wie tief ist die Grube? ($c = 340$ m.)

Hilfsrechnung:

Zunächst ist

$$\left(t - \frac{s}{c}\right)^2 = \frac{2s}{g} \text{ oder}$$

$$t^2 - \frac{2ts}{c} + \frac{s^2}{c^2} = \frac{2s}{g} \text{ oder}$$

$$\frac{s^2}{c^2} - \frac{2ts}{c} - \frac{2s}{g} = -t^2 \text{ oder}$$

$$s^2 - 2cts - \frac{2c^2s}{g} = -c^2t^2$$

$$s^2 - 2cs\left(t + \frac{c}{g}\right) = -c^2t^2$$

$$s^2 - 2cs\left(t+\frac{c}{g}\right) + c^2\left(t+\frac{c}{g}\right)^2 = c^2\left(t+\frac{c}{g}\right)^2 - c^2t^2$$

$$s^2 - 2cs\left(t+\frac{c}{g}\right) + c^2\left(t+\frac{c}{g}\right)^2 = c^2\left[\left(t+\frac{c}{g}\right)^2 - t^2\right]$$

$$s^2 - 2cs\left(t+\frac{c}{g}\right) + c^2\left(t+\frac{c}{g}\right)^2 = c^2\left(\frac{2ct}{g} + \frac{c^2}{g^2}\right)$$

$$s - c\left(t+\frac{c}{g}\right) = \pm c\sqrt{\frac{c}{g}\left(2t + \frac{c}{g}\right)} \text{ oder}$$

$$s = c\left(t+\frac{c}{g}\right) \pm c\sqrt{\frac{c}{g}\left(2t + \frac{c}{g}\right)} \text{ oder}$$

$$s = c\left[\left(t+\frac{c}{g}\right) \pm \sqrt{\frac{c}{g}\left(2t + \frac{b}{g}\right)}\right]$$

Auflösung. Wir reduzieren die vorher benutzte Formel auf die Größe s und erhalten nach nebenstehender Hilfsrechnung

$$s = c\left[\left(t+\frac{c}{g}\right) \pm \sqrt{\frac{c}{g}\left(2t+\frac{c}{g}\right)}\right].$$

Setzen wir da die gegebenen Zahlenwerte ein, so ist

$$s = 340\left[\left(10 + \frac{340}{9,81}\right) \pm \sqrt{\frac{340}{9,81}\left(20 + \frac{340}{9,81}\right)}\right]$$

oder da

$$\frac{340}{9,81} = 34,66$$

ist, so erhalten wir

$$s = 340\,[44,66 \pm \sqrt{34,66 \,.\, 54,66}]$$

oder da

$$\begin{aligned} \log 34,66 &= 1,53981 \\ + \log 54,66 &= 1,73767 \\ & \quad 3,27748 \,.\, {}^1/_2 \\ & \quad 1,63874 \\ \text{num} \log & \; 43,53 \end{aligned}$$

$$s = 340\,[44,66 \pm 43,53].$$

Da es sich nicht um eine etwa 30000 m tiefe Grube handeln kann, so gilt hier nur das Minusvorzeichen, und es ist

$$s = 340 \,.\, 1,13 = \mathbf{384,2 \text{ m.}}$$

Aufgabe 214. Eine Schallquelle gibt den Ton $a^2 = 870$ Schwingungen bei einer Schallgeschwindigkeit von $c = 350$ m in der Sekunde.

Welchen Ton hört der Beobachter, wenn sich derselbe mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit von 20 m

a) nach der ruhenden Schallquelle hin,

b) von der ruhenden Schallquelle hinwegbewegt?

Auflösung. a) Nach Formel auf S. 141 ist

$$N = n\left(1 + \frac{s}{c}\right)$$

oder

$$N_1 = 870\left(1 + \frac{20}{350}\right)$$

oder

$$N_1 = 870 \,.\, 37/35 = \mathbf{919,7.}$$

Welchen Ton hört der Beobachter, wenn die Schallquelle mit der Geschwindigkeit von 20 m sich

c) nach dem ruhenden Beobachter hin

d) von dem ruhenden Beobachter hinwegbewegt?

Welchen Ton hört der Beobachter, wenn sich Schallquelle und Beobachter beide mit der gleichen Geschwindigkeit von 20 m

e) nacheinander hin oder

f) voneinander weg bewegen?

Die Schallgeschwindigkeit sei $c = 350$ m.

Erkl. 914. Die Tonquelle gibt den Ton a^2. Bei den Bedingungen unter a) und c) hört der Beobachter ais^2, unter b) und d) gis^2, unter e) h^2 und unter f) g^2. Der ursprüngliche Ton wird also um $^1/_2$ resp. ganzen Ton erhöht oder erniedrigt.

b) Nach der zweiten Formel auf S. 141 ist

$$N = n\left(1 - \frac{s}{c}\right)$$

oder

$$N_2 = 870\ (1 - 2/35)$$

oder

$$N_2 = 870 \,.\, 33/35 = \mathbf{820{,}3.}$$

c) Nach Formel 1) auf Seite 142 ist

$$N = \frac{c\,n}{c - s}$$

oder

$$N_3 = 870 \,.\, 33/35 = \mathbf{922{,}7.}$$

d) Nach Formel 2) auf Seite 142 ist

$$N = \frac{c\,n}{c + s}$$

oder

$$N_4 = 870 \,.\, 35/37 = \mathbf{823.}$$

e) Nähert sich der Beobachter der Schallquelle, so erhält er 919,7 — 870 = 49,7 Wellen mehr als im Ruhezustande. Nähert sich die Schallquelle dem Beobachter, so erhält er 922,7 — 870 = 52,7 Wellen mehr. Bewegen sich beide gegeneinander, so erhält der Beobachter

$$N_5 = (N_1 - 870) + (N_3 - 870) + 870$$

oder

$$N_5 = N_1 + N_3 - 870$$

oder

1842,4 — 870 = **972,4** Wellen.

f) Entfernen sich beide, so haben wir

$$N_6 = (N_2 - 870) + (N_4 - 870) + 870$$

oder

$$N_6 = (-50{,}3) + (-47) + 870$$

oder

$$N_6 = 870 - 97{,}3 = \mathbf{772{,}7.}$$

Aufgabe 215. a) Wie schnell muß sich ein Ohr dem Tone a_1 nähern, um h_1 zu hören, wie schnell b) um a^2 zu hören, c) wie schnell muß sich das Ohr vom Tone a_1 entfernen, um g_1 zu hören, d) um nichts zu hören?

($c = 340$ m, $a_1 = 435$ Schwingungen, $h_1 = 488{,}3$ Schwingungen, $g_1 = 387{,}5$ Schwingungen.)

Auflösung. a) Aus Formel 1) auf S. 141

$$N = n\left(1 + \frac{s}{c}\right)$$

folgt

$$s = c\left(\frac{N}{n} - 1\right)$$

oder

Hilfsrechnung 1:

$$\begin{aligned} \log 340 &= 2{,}53148 \\ + \log 53{,}3 &= 1{,}72673 \\ &\quad 4{,}25821 \\ - \log 435 &= 2{,}63849 \\ \log s_1 &= 1{,}61972. \end{aligned}$$

Hilfsrechnung 2:

$$\begin{aligned} \log 340 &= 2{,}53148 \\ + \log 47{,}5 &= 1{,}67669 \\ &\quad 4{,}20817 \\ - \log 435 &= 2{,}63849 \\ &\quad 1{,}56968. \end{aligned}$$

$$s_1 = 340 \left(\frac{488{,}3}{435} - 1\right)$$

oder

$$s_1 = 340 \cdot \frac{53{,}3}{435}$$

oder

$$s_1 = \mathbf{41{,}66\ m.}$$

b) $s_2 = 340\left(\frac{870}{435} - 1\right)$ oder

$$s_2 = \mathbf{340\ m.}$$

c) Aus Formel 2) Seite 141

$$N = n\left(1 - \frac{s}{c}\right)$$

folgt

$$s_3 = c\left(1 - \frac{N}{n}\right)$$

oder

$$s_3 = 340\left(1 - \frac{387{,}5}{435}\right)$$

oder

$$s_3 = 340 \cdot \frac{47{,}5}{435} = \mathbf{37{,}13\ m.}$$

d) Ist $N = 0$, dann ergibt sich

$$s_4 = 340 \cdot (1 - 0/435)$$

oder

$$s_4 = \mathbf{340\ m.}$$

Aufgabe 216. Mit welcher Geschwindigkeit nähert oder entfernt sich eine Lokomotive von einem Beobachter, wenn ihr anfänglicher Ton a) um einen großen halben Ton ($^{16}/_{15}$) erhöht, b) erniedrigt wird? ($c = 340$ m.)

Auflösung. a) Aus Formel 1) Seite 142 folgt für

$$s = \frac{c\,(N - n)}{N}$$

oder

$$s = 340 \cdot {}^1/_{16} = \mathbf{21^1/_4\ m.}$$

b) Aus Formel 2) Seite 142 folgt für

$$s = \frac{c\,(n - N)}{N}$$

oder

$$s = 340 \cdot {}^1/_{15} = \mathbf{22^2/_3\ m.}$$

K. Ungelöste Aufgaben.

Aufgabe 217. Bei einem Gewitter beobachtet man zwischen Blitz und Donner eine Zeit von $18\frac{1}{2}$ Sekunden, wieviel beträgt der kleinste Abstand des Blitzes, wenn $c = 333\frac{1}{3}$ m gerechnet wird?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 185.

Aufgabe 218. In welcher Zeit würde der Schall im lufterfüllten Raume bei $333\frac{1}{3}$ m sekundlicher Geschwindigkeit einen Weg, gleich der Entfernung der Erde von der Sonne, von 153 471 154 km zurücklegen?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 186, wobei das Jahr zu 365 Tagen gerechnet wird.

Aufgabe 219. Wenn der Schall zum Durchlaufen des Erdumfangs von 40 070 000 m im Wasser 7 Stunden $37\frac{1}{2}$ Minuten gebraucht, wie groß ist dann seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Wasser?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 187.

Aufgabe 220. Wie ändert sich die Schwingungszahl vom Grundtone einer gedeckten Orgelpfeife von 166 mm Länge bei einer Polartemperatur von -40^0 C, wenn die Schallgeschwindigkeit bei 0^0 332,4 m beträgt?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 188 mit dem Unterschiede, daß hier

$$N = c/4\,l$$

zu setzen ist.

Aufgabe 221. Kendall fand in den Polargegenden bei -40^0 C die Geschwindigkeit des Schalles zu 313,9 m.

a) Welche Geschwindigkeit ergibt sich hieraus bei einer Temperatur von 0^0 C?

b) Setzen wir aber wie bisher, die Schallgeschwindigkeit bei 0^0 $c = 332,4$ m, wie groß müßte dieselbe dann der gegebenen Formel nach bei -40^0 sein?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt unter Anwendung der Lösung der Aufgabe 189 unter Einsetzung der gegebenen Werte.

Aufgabe 222. Wie groß ist die Temperatur der Luft in einem heißen Raume, in welchem die Schallgeschwindigkeit 718 m beträgt?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 189.

Aufgabe 223. Eine Pfeife gibt bei einer Lufttemperatur von 15^0 nach der reinen Stimmung den Ton c^2 mit 522 Schwingungen, wie tief müßte die Temperatur sein, wenn dieselbe Pfeife das nächsttiefere $a = 435$ Schwingungen geben sollte?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 190.

Aufgabe 224. Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen des Tones C von 256 Schwingungen in einem Messingrohre von 1 cm Durchmesser 329 m, dagegen in freier Luft 340 m beträgt, wie groß ist dann der Reibungskoeffizient?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 191.

Aufgabe 225. Mit Hilfe eines Daniell'schen Hygrometers wurde bei 765 mm Barometerstand und 25^0 Wärme die relative Feuchtigkeit der Luft zu 70 Prozent ermittelt; wie groß ist hiernach die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, wenn dieselbe bei 0^0 und in trockener Luft $c = 332,4$ m beträgt?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 192. Die Spannkraft der mit Dampf gesättigten Luft ist bei 25^0 C. $f_0 = 23,55$ mm. Da die Luft aber nicht dampfgesättigt ist, sondern nur $70^0/_0$ Feuchtigkeit enthält, so haben wir für $f = 23,55 \,.\, 07$ oder $f = 16,5$ mm zu setzen.

Aufgabe 226. Wie groß ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles

a) im Ammoniakgase bei 0^0 ($s = 0,596$).

b) im Chlorgase ($s = 2,47$) bei 20, wenn dieselbe in der atmosphärischen Luft bei $0^0 = 332,4$ m beträgt?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 194.

Aufgabe 227. Eine Pfeife mit atmosphärischer Luft gefüllt, gibt beim Anblasen den Ton g^2 mit 775 Schwingungen. Welche Töne wird dieselbe Pfeife nach der temperierten Stim-

Andeutung. Die Auflösung erfolgt annalog der gelösten Aufgabe 193.

mung geben, wenn sie a) mit Lachgas ($s = 1{,}5273$) b) mit Knallgas ($s = 0{,}4134$) gefüllt und angeblasen wird?

Aufgabe 228. Wie groß ist das spezifische Gewicht eines Gases, in welchem die Schallgeschwindigkeit 1,223 mal so groß ist als in der atmosphärischen Luft bei 0°?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 195.

Aufgabe 229. Eine 75 cm lange gedeckte Pfeife gibt bei 10° C mit Leuchtgas angeblasen einen Grundton von der Schwingungszahl 153,5. Wie berechnet sich hieraus das spezifische Gewicht des benutzten Leuchtgases?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 196.

Aufgabe 230. Wie groß ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in folgenden Flüssigkeiten, von denen das spezifische Gewicht s und die Kompressibilität λ gegeben ist?

a) Kochsalzlösung: $s = 1{,}192$
$\lambda = 0{,}0000349$;

b) Natronlösung: $s = 1{,}16$
$\lambda = 0{,}0000348$.

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 197. Vergleiche die erhaltenen Resultate mit der Tabelle auf Seite 46, welche noch Material zu weiteren Aufgaben bietet.

Aufgabe 231. Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Salpetersäure vom spezifischen Gewichte 1,403 $4\frac{1}{2}$mal so groß ist als in der atmosphärischen Luft, wie groß ist dann a) die Kompressibilität b) der Elastizitätsmodul derselben?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 198.

Aufgabe 232. Welchen Ton gibt eine Wassersäule in einer 1 m langen Orgelpfeife, wenn die Schallgeschwindigkeit in Röhren nur $\sqrt{2/3}$ mal so groß ist als in der freien Flüssigkeit, und in letzterer $c = 1425$ m beträgt?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 199. Reichlichen Stoff zu analogen Aufgaben bietet die Tabelle auf Seite 46, welche neben der Schallgeschwindigkeit in der Röhre oder Säule auch die in der unbegrenzten Flüssigkeit enthält.

Aufgabe 233. Welchen Ton erhält man durch die Längsschwingungen eines 90 cm langen, an beiden Enden freien Eschenholzstabes, je nachdem derselbe der Länge nach, oder radial oder tangential aus dem Holze geschnitten ist?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 200 unter Benutzung der Tabelle auf Seite 54.

Aufgabe 234. Ein in der Mitte festgehaltener Messingstab von 50 cm Länge gibt, an dem einen Ende gerieben, ein etwas hohes g^4 von 3122 Schwingungen. a) Wie groß ist hiernach die Schallgeschwindigkeit im Messing und b) wie groß ist sein Elastizitätsmodulus, wenn sein spezifisches Gewicht 8,6 gesetzt wird?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 201.

Aufgabe 235. Wie ändert sich die Tonhöhe eines in seiner Mitte festgeklemmten Eisenstabes von 75 cm Länge, wenn derselbe von 20 auf 100 und 200° erwärmt wird?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 202. (Nach der Tabelle auf Seite 54 ist $c = 5033$ resp. 5301 resp. 4687 m).

Aufgabe 236. Ein Golddraht von 18,035 spezifischem Gewicht und 8131 kg Elastizitätsmodul hat welche Schallgeschwindigkeit?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 203 a.

Aufgabe 237. Welche Schallgeschwindigkeit hat

a) ein Zinkstab von 7,06 spezifischem Gewicht und 8734 kg Elastizitätsmodul?

b) ein Stab aus Packfong von 8,436 spezifischem Gewicht und 11 500 kg Elastizitätsmodul?

c) Welchen Ton gibt ein in seiner Mitte befestigter Zinkstab von 600 mm Länge, wenn er an einem Ende gerieben wird?

d) Wie lang muß der Packfongstab sein, wenn er denselben Ton geben soll?

e) Welchen Ton gibt ein 600 mm langer Packfongstab und

f) wie lang muß ein Zinkstab von demselben Grundtone sein?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 203.

Aufgabe 238. Eine in der Mitte festgehaltene und der Länge nach mit einem nassen Tuche geriebene Glasröhre von 150 cm Länge gibt den Grundton einer offenen 9 cm langen Pfeife. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit im Glase?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 204, nur muß hier der Rechnung die Formel

$$n = c/2l$$

zugrunde gelegt werden.

Aufgabe 239. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit im gebrannten Tone, wenn eine Tonröhre als tiefsten Longitudinalton das g^4 und eine gleichlange offene Pfeife das c^1 nach der reinen Stimmung gibt?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 205.

Aufgabe 240. Es sei die Schallgeschwindigkeit bei $0^0 = 332$ m. Wie weit muß eine Echo gebende Wand von dem Rufenden entfernt sein, damit ein in einer Sekunde gesprochenes fünfsilbiges Wort a) sofort nach dem Ausruf der letzten Silbe b) 4 Sekunden später gehört wird?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 206.

Aufgabe 241. Zwei Beobachter A und B sind beide von einer Echo gebenden Wand gleichweit entfernt. Der Beobachter A spricht in der ersten Sekunde ein dreisilbiges Wort, welches der Beobachter B in der dritten Sekunde direkt und in der vierten Sekunde reflektiert hört. Wie weit sind beide Beobachter voneinander, sowie von der Wand entfernt? (c sei 332 m.)

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 207.

Aufgabe 242. Ein Beobachter ruft gegen eine reflektierende Wand in $1\frac{1}{2}$ Sekunden das Wort „Imponderabile" und hört durch Echo das Wort „Ponderabile". Wie groß ist die Entfernung zwischen Wand und Beobachter? b) Wie weit hat sich der Beobachter der Wand genähert, wenn er bei einem zweiten Versuche nur die drei Silben „rabile" hört? ($c = 340$ m.)

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 208.

Aufgabe 243. Ein Schallstrahl tritt unter einem Einfallswinkel von 25° aus dem leichteren Wasserstoff in die dichtere atmosphärische Luft. Wenn nun die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Wasserstoff 3,812 mal so groß ist, als in der atmosphärischen Luft, wie groß ist dann der Brechungswinkel?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 209. (Siehe Tabelle auf Seite 135.)

Aufgabe 244. Ein Schallstrahl tritt aus der atmosphärischen Luft in schweflige Säure. Wie groß ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in letzterer, wenn der Einfallswinkel 61° 22', der Brechungswinkel und 35° 50' und die Schallgeschwindigkeit in Luft 340 m beträgt?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 210.

Aufgabe 245. Ein Schallstrahl tritt unter einem Winkel von 60° in Quecksilber; wenn nun die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Wasser 4,3 und im Quecksilber 3,7 mal so groß ist, wie in Luft, wie groß ist dann der Brechungswinkel?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 211.

Aufgabe 246. Nach wieviel Sekunden hört man in einem 490,5 m tiefen Schachte einen Stein aufschlagen? ($c = 332$ m.)

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 212.

Aufgabe 247. Wie tief ist ein Schacht, in welchem man einen Stein nach 6 Sekunden aufschlagen hört? ($c = 340$.)

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 213.

Aufgabe 248. Eine Lokomotive pfeift $c^1 = 517$ Schwingungen bei $c = 333$ m Schallgeschwindigkeit. Welchen Ton hört der Beobachter, wenn er sich mit 16 m Geschwindigkeit a) der Schallquelle nähert, b) von derselben entfernt c) wenn die Lokomotive mit 16 m Geschwindigkeit nach dem stillstehenden Beobachter hin, d) von

Andeutung. Die Auflösung erfolgt annalog der gelösten Aufgabe 214.

demselben wegfährt e) wenn Beobachter und Maschine mit je 16 m Geschwindigkeit sich nacheinander hin f) voneinander wegbewegen?

Aufgabe 249. Wie schnell muß sich ein Beobachter einer Tonquelle nähern, um a) die höhere Terz b) die höhere Quinte, und wie schnell muß er sich entfernen, um c) die tiefere Terz d) die tiefere Quinte zu hören?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 215.

Aufgabe 250. Mit welcher Geschwindigkeit muß eine Lokomotive mit dem Pfeifentone $c^3 = 1035$ Schwingungen bei $c = 340$ m Schallgeschwindigkeit, a) sich einem Beobachter nähern, damit derselbe 60 Schwingungen sekundlich mehr empfängt, b) von einem Beobachter entfernen, damit derselbe sekundlich 60 Schwingungen weniger empfängt?

Andeutung. Die Auflösung erfolgt analog der gelösten Aufgabe 216.

II. Die Erscheinungen zusammengesetzter Schwingungsbewegungen.

A. Die durch Zusammensetzung von Schwingungsbewegungen veränderten Wellenformen.

Anmerkung XXXIII. Zum besseren Verständnis der folgenden Erörterungen über die zusammengesetzten Schwingungserscheinungen der Schallwellen mögen zunächst die folgenden Sätze in Erinnerung gebracht werden:

1) Der Satz von der Koexistenz der Bewegungen und Kräfte, oder das Prinzip der Unabhängigkeit der Kräfte lautet: Wenn mehrere Kräfte bewegend auf ein und denselben materiellen Punkt wirken, so führt derselbe eine Bewegung aus, als ob die einzelnen Bewegungen, ohne einander gegenseitig zu stören, unabhängig voneinander wirklich ausgeführt würden, d. h. es erfolgt die Wirkung jeder Kraft ganz unabhängig davon, ob gleichzeitig mit ihr eine andere zur Wirkung kommt, oder: Die Wirkung einer Summe von Kräften ist gleich der Summe der Wirkungen der einzelnen Kräfte.

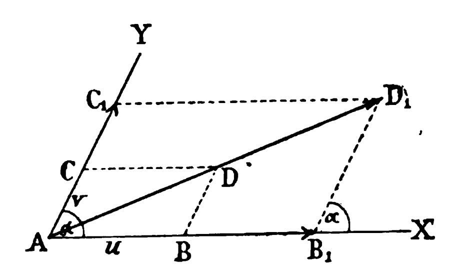
2) Erfolgen die einzelnen einfachen Bewegungen in einer und derselben geraden Linie so ist die resultierende zusammengesetzte Bewegung

a) gleich der Summe der einfachen Bewegungen, wenn letztere nach gleichen Richtungen vor sich gehen;

b) gleich der Differenz der einfachen Bewegungen, wenn die Richtungen der letzteren entgegengesetzt sind.

3) Wenn einem Körper A zwei Bewegungen nach verschiedenen Richtungen erteilt werden, von denen die eine allein ihn nach B, die andere in derselben Zeit ihn nach C führen würde, so ist der Ort, an welchem sich der Körper am Ende die-

Fig. 523.



ser Zeit wirklich befindet, wenn beide Bewegungen zugleich ausgeführt werden, der dem Anfangspunkte A der Bewegung gegenüberliegende Endpunkt D eines aus den beiden Einzelbewegungen gebildeten Parallelogramms. (Siehe R. Klimpert, Lehrbuch der Dynamik, Seite 98 u. f.)

4) Auch die resultierende Bewegung jedes Wasser- und Luftteilchens ist gleich der Summe der demselben mitgeteilten Einzelbewegungen: folglich entsteht

a) aus dem Zusammentreffen zweier Wellenberge, die in gleicher oder entgegengesetzter Richtung fortschreiten, ein einziger Wellenberg, dessen Höhe gleich der Summe beider ist. In gleicher Weise bilden auch zwei zusammentreffende Wellentäler ein einziges, dessen Tiefe fast der Summe der Tiefen beider gleich ist.

b) Trifft aber das Tal einer Welle mit dem Berge einer andern zusammen, so heben sich beide auf, so daß die Oberfläche der Wellen hier mit dem gewöhnlichen Niveau zusammenfällt. Wenn demnach die Ausgangspunkte zweier geich langen Wellen von gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Fortpflanzungsrichtung um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen voneinander entfernt sind, so verstärken die Wellen einander; sind aber die Ausgangspunkte um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen voneinander entfernt, so schwächen die Wellen einander und heben bei gleichen Amplituden einander auf. (S. den ersten Band unserer Akustik, Seite 48 u. f. sowie auch Erkl. 117 auf Seite 84).

---

a) Die Zusammensetzung von Schwingungen gleicher Richtung.

Frage 986. Wie läßt sich auf graphischem Wege die Wellenform feststellen, welche durch Zusammensetzung zweier Schwingungsbewegungen entsteht, die längs derselben geraden Linie bei gleicher Amplitude und gleicher Wellenlänge a) mit gleichen b) mit verschiedenen Schwingungsphasen vor sich gehen?

Antwort. Haben zwei gleiche Wellenbewegungen gleiche Anfangsphasen, wie es die Kurven *A* und *B* in der Fig. 524 veranschaulichen, so erhalten wir die resultierende Schwingungsbewegung C, indem wir an gleichen Punkten derselben wagerechten Achse die senkrechten Ordinaten dieser Kurven, welche die Elongation oder die Ausweichung der schwingenden Teilchen vorstellen, addiert oder subtrahiert auftragen, je nachdem sie auf einer Seite oder zu beiden Seiten der wagerechten Achse liegen. Hierdurch entsteht dann die ganz neue Wellenform *C*, deren resultierende Wellen doppelte Wellenhöhe besitzen (entsprechend dem 4. Satze der vorstehenden Anmerkung).

Sind die Phasen beider Wellenbewegungen einander entgegengesetzt, entsprechen sie also einem Zeitunterschiede von der halben Schwingungsdauer (gleich $\frac{1}{2}T$),

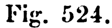
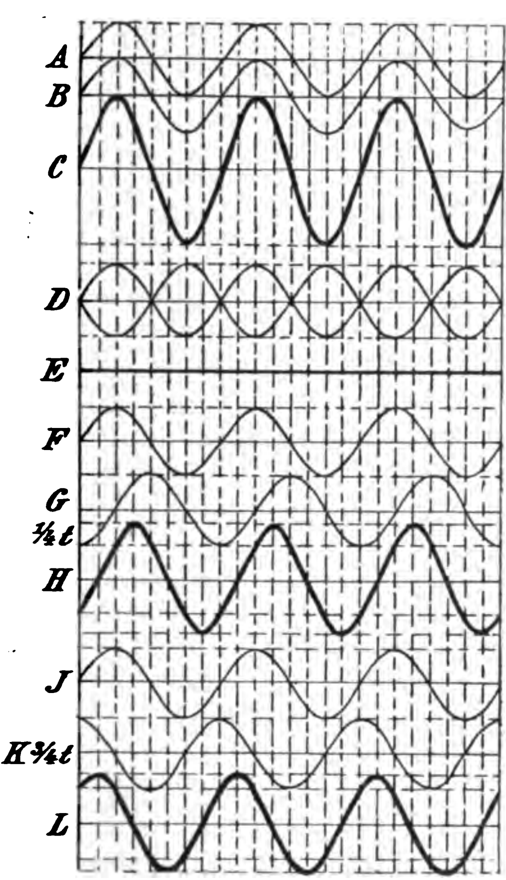


Fig. 524.



wie es in der nebenstehenden Reihe *D* dargestellt ist, so ist die Amplitude der resultierenden Bewegung kleiner als diejenige der beiden primären Bewegungen, und wenn die Wellenhöhen der beiden letzteren (wie vorausgesetzt wurde) einander gleich sind, so ist die Höhe der resultierenden Welle gleich Null, d. h. zwei gleiche und einander entgegengesetzte Wellenbewegungen heben einander auf; die graphische Darstellung liefert also hier eine gerade Linie *E*.

Verbinden wir in derselben Weise die beiden Wellen in der Lage *F* und *G* oder in der Lage *J* und *K* miteinander, wo die Phasen um ¼ resp. ¾ der Wellenlänge verschoben sind, so entstehen die von *C* verschiedenen Wellen *H* und *L*.

Frage 987. Die vorstehend erörterten Schwingungsformen werden auftreten, sobald zwei Töne von gleicher Höhe in gleicher Stärke erregt werden. Weit wichtiger sind diejenigen Fälle, welche der transversalen Schwingungsart einer Saite entsprechen und die sogenannte Klangfarbe derselben verursachen. Wir haben bereits im II. Band des vorliegenden Lehrbuches erfahren, dass bei einer im Ganzen schwingenden Saite auch zugleich jede Hälfte, jeder dritte, vierte, usw. Teil schwingen kann, so dass wir außer dem Grundtone die den Teilen entsprechenden Obertöne

Antwort. Beginnen wir mit dem einfachsten Falle, unter der Annahme, dass die Saite ihren Grundton und zugleich, aber schwächer, dessen Oktave hören läßt, so können die beiden gestrichelten Kurven in Fig. 525 die entsprechenden Schwingungsarten vorstellen.

Wir ziehen nun durch mehrere, auf der Achse *AB* beliebig angenommene Punkte die zugehörigen Lote und addieren oder subtrahieren die den einzelnen Schwingungskurven zugehörigen Stücke (Ordinaten), so dass z. B. in der zu dem Punkte H gehörigen Ordi-

hören, deren Schwingungszahlen 2, 3, 4 usw. mal so groß sind als die des Grundtones. Auf welche Weise erhalten wir ein Bild von dem Zusammensein dieser Schwingungsarten einer Saite?

Erkl. 915. Die Eigenschaft, dass in den Zuständen der Ruhe die Krümmungen eine abwechselnde Lage annehmen, äußert sich in allen den Fällen, wo mit der ersten Schwingungsart einer Saite eine oder mehrere verbunden sind, die mit den geraden Zahlen 2, 4, 6 übereinkommen. In diesen Fällen gehen auch nicht alle Punkte der Saite zugleich durch die gerade Mittellinie *ABC*, indem, wenn der Punkt *F* (Fig. 525) nach *C* gekommen ist, der Punkt *E* schon über den Punkt H, durch die Weite *HG* hinausgegangen ist, und hingegen der Punkt *E*' noch nicht bis *K* gelangt, sondern um den Weg *K'G'* zurückgeblieben ist.

Fig. 525.

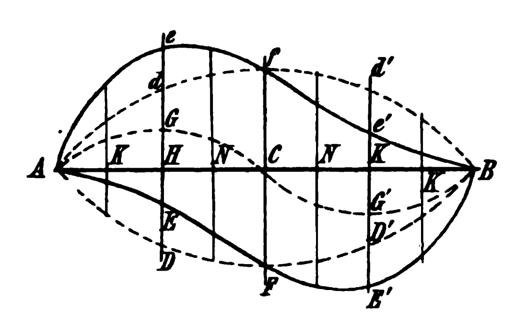
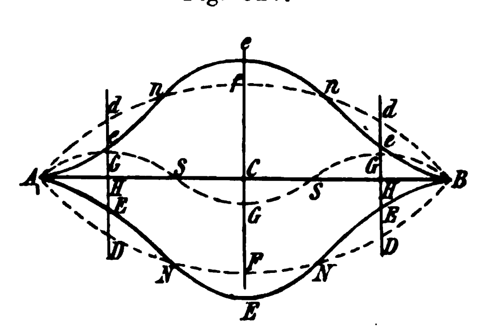


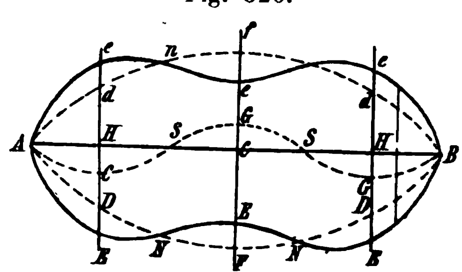
Fig. 527.



nate nach oben zu *Hd* plus *de* gleich *He*, nach unten zu *HD* minus *DE* gleich *HE* die respektiven Punkte *e* und *E* der zusammengesetzten Schwingungskurve gibt, vorausgesetzt, dass *de* gleich *DE* gleich *GH* ist. Verfahren wir in gleicher Weise mit den Ordinaten der Punkte *K, N, C,* usw., und verbinden wir die so erhaltenen Punkte *e, f, e',* resp. *E, F, E',* durch eine kontinuierliche Kurve, so ergibt sich als Resultat des Zusammenwirkens dieser beiden Wellensysteme das Bild der Saite in ihren beiden äußersten Schwingungslagen.

Soll die erste Schwingungsart einer Saite mit derjenigen, wo sie in drei Bäuchen schwingt, d. h. der Grundton mit der Quinte seiner Oktave verbunden werden, so kann die resultierende Kurve zwei verschiedene Lagen haben, entweder so, wie in Fig. 526, oder so,

Fig. 526.



wie in Fig. 527. Man ziehe wieder durch einen willkürlich angenommenen Punkt *H* die Ordinate *HD*, mache *DE* gleich *HG*, so wird der Punkt *E* und alle auf gleiche Weise bestimmten Punkte die Schwingungskurve bilden, welche die Saite in ihren äußersten Ruhelagen einnimmt.

In ähnlicher Weise lassen sich diejenigen krummen Linien, welche dem Grundtone und seiner Quinte entsprechen, also den Teilungen der Saite in zwei und drei gleiche Teile zukommen, mitein-

Fig. 528 a.

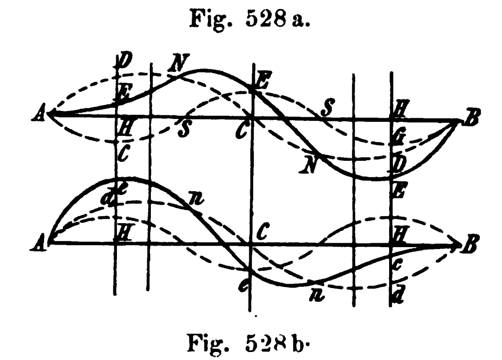


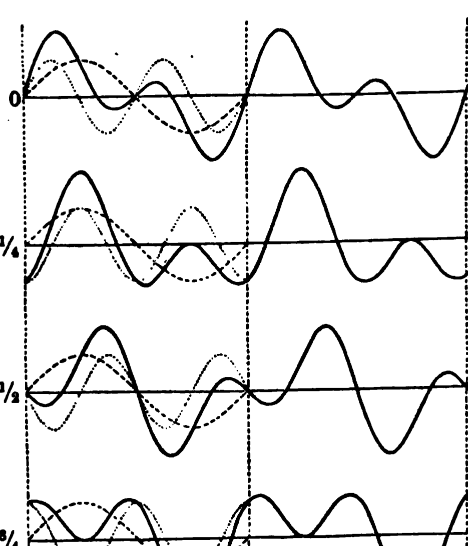
Fig. 528 b.

ander verbinden, wodurch die Krümmungen 528 a und b entstehen.

Durch Ausdehnung dieses Kombinationsverfahrens auf eine größere Anzahl von Schwingungen, welche in der Schwingungsdauer, in der Schwingungsweite und der Schwingungsphase voneinander abweichen, können wir die mannigfaltigsten resultierenden Kurven erhalten, wie einige der folgenden Figuren zeigen werden.

Erkl. 916. Während in Fig. 525 die Zusammenstellung des Grundtones mit seiner Oktave durch eine halbe Wellenlänge des Grundtones unter der Voraussetzung dargestellt ist, dass die Amplitude der Oktave wesentlich kleiner als die des Grundtones ist, zeigt Fig. 529 die Zusammensetzung derselben beiden Schwingungskurven von gleicher Amplitude, durch zwei Wellenlängen des Grundtones, und zwar für die Phasendifferenzen (oder Gangunterschiede) 0, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{4}$ der Länge der größeren Welle dargestellt. Man sieht hieraus, dass die resultierende Wellenform wesentlich von der Phasendifferenz der sie erregenden Schwingungen abhängt. Da außerdem noch Unterschiede in den Wellenlängen und Amplituden stattfinden können, so ist erklärlich, dass die resultierenden Wellen unendlich viele verschiedene Formen zeigen können.

Fig. 529.



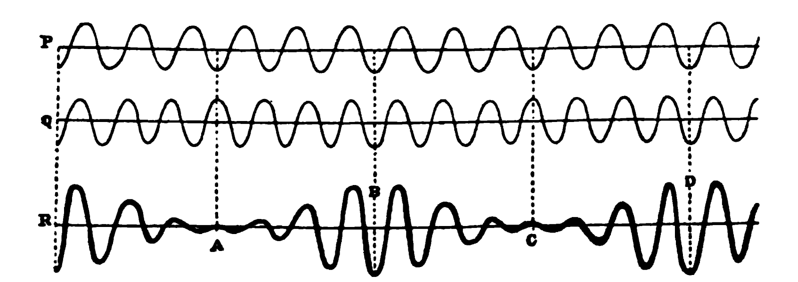
Frage 988. Als was läßt sich jede beliebige periodische Schwingungsbewegung, jede Welle, was immer für eine zusammengesetzte Form sie haben mag, ansehen?

Antwort. Es läßt sich jede Wellenform als das Ergebnis der Zusammensetzung einfacher Schwingungsbewegungen auffassen, für die dieselben Gesetze gelten wie für das einfache Pendel. Selbst die verwickeltste periodische Bewegung kann demnach in eine Reihe einfacher Pendelbewegungen zerlegt werden, aus deren Zusammenwirken die resultierende Bewegung entstanden gelten kann.

Frage 989. Welche Eigentümlichkeiten zeigt die resultierende Kurve zweier Wellenbewegungen von derselben Richtung, deren Schwingungsdauern nur wenig voneinander verschieden sind?

Antwort. Haben zwei Wellenbewegungen nahezu gleiche Perioden, wie dies z. B. durch die Wellenlinien *P* und *Q* (Fig. 530) dargestellt wird, so verstärken sie einander so lange, als die Ablenkungen nach derselben Seite stattfinden oder vergrößern ihre Amplitude. Dies ist z. B. bei den Punkten *B* und *D* der Linie *R*, welche die resultierende Kurve darstellt, der Fall. Von diesen Zeitpunkten ab gerechnet, weicht aber die eine Schwingungsbewegung von der andern, bezüglich der Phase immer mehr und mehr ab, bis beide Bewegungen schließlich entgegengesetzte Phasen erhalten und einander entgegenwirken. Sind die Amplituden der primären Schwingungen einander gleich, so ist der kleinste Wert der Amplitude in der resultierenden Kurve gleich Null, der größte Wert derselben doppelt so groß wie die jeder der beiden primären Schwingungen.

Fig. 530.



Erkl. 917. Wir werden in den folgenden Abschnitten noch zahlreiche Erscheinungen aus dem Gebiete der Akustik kennen lernen, welche vorzügliche Beispiele sowohl von fortdauernder Vernichtung der Schwingungen durch Interferenz, als auch von periodischen Veränderungen der Amplituden, die als sogenannte Schwebungen bekannt sind, liefern.

Frage 990. Wir haben aus den vorstehenden Zeilen ersehen, in welcher Weise die resultierenden Kurven auf dem Wege der Konstruktion gefunden werden können; viel interessanter ist es aber, solche Schwingungskurven auf dem Wege des Experiments anschau-

Antwort. Wir können uns zu diesem Zwecke des Phonautographen bedienen, den wir schon im ersten Bande der Akustik Seite 102 kennen lernten. Erregen wir vor dem Schalltrichter desselben zwei

lich zu machen. Welcher Methoden können wir uns zu diesem Zwecke bedienen?

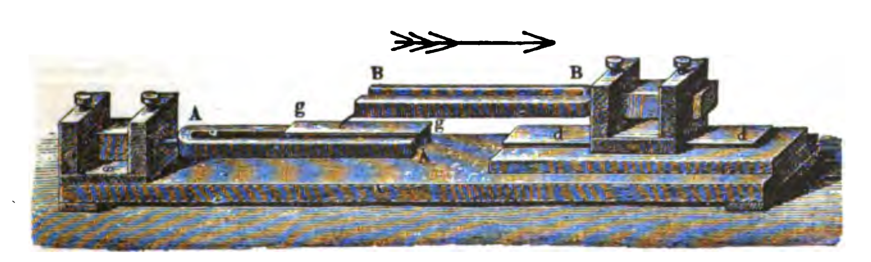
Erkl. 918. Da der Membranphonautograph von der Tonstärke, sowie von der Klangfarbe und den komplizierten Kombinationen regelmäßiger und unregelmäßiger Klänge kein verläßliches Bild gibt, so sind die in den folgenden Zeilen beschriebenen Methoden vorzuziehen.

Töne von verschiedener Schwingungszahl, so zeichnet die Membranfeder auf der berußten Walze Kombinationskurven auf, an denen man leicht alle charakteristischen Eigenschaften der oben theoretisch konstruierten Kombinationskurven erkennen kann.

Frage 991. Der Phonautograph hat den Zweck, die auf ihn aus der Luft eindringenden zusammengesetzten Wellen aufzuzeichnen; welches Verfahren können wir aber anwenden, um solche Zeichnungen auf mechanischem Wege zu erhalten, ohne dass die zusammengesetzten Wellen in der Luft zur Vereinigung gelangen?

Antwort. Wir lassen die schwingende Zinke einer Stimmgabel ihre Wellen auf einer schwingenden Schreibfläche niederschreiben, welche von einer anderen tönenden Gabel getragen wird. Fig. 531 zeigt den dazu geeigneten Apparat, bestehend aus zwei großen Stimmgabeln A und B, von

Fig. 531.

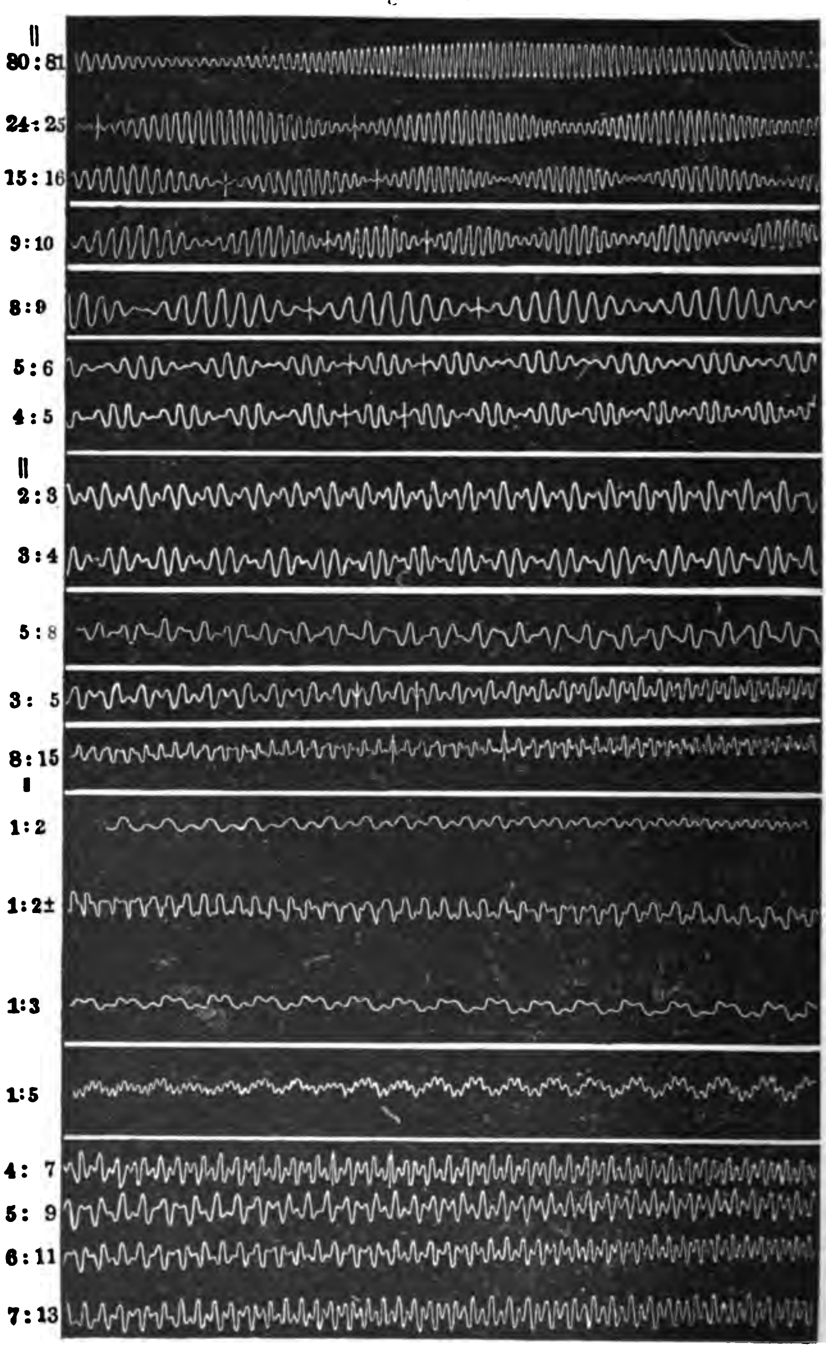


denen die erstere feststeht, während die letztere in einem Schlitten befestigt ist, dem das Brettchen d in der Weise zur Führung dient, daß die Stimmgabel B sich selbst parallel über die Stimmgabel A hinweggezogen werden kann. Die feste Stimmgabel trägt einen schmalen Streifen g von dünnem Spiegelglas, welcher berußt wird, oder auf welchem ein berußter Papierstreifen befestigt ist. An dem einen Arme der Stimmgabel B ist in der (im ersten Bande der Akustik, Seite 90) beschriebenen

Erkl. 919. Die Figur 532 zeigt eine Anzahl auf diese Weise von König erhaltener Kurven. Das Verhältnis der Schwingungszahlen ist daneben angegeben. Die erste Kurve entspricht dem syntonischen Komma, die zweite dem kleinen, die dritte dem großen halben Tone, die vierte und fünfte dem kleinen und großen ganzen Tone, während die folgenden den übrigen Intervallen der Tonleiter entsprechen und zum Schluß noch einige in der Musik nicht gebräuchliche Intervalle angefügt sind. Das der 14ten Kurve beigesetzte ± Zeichen bedeutet eine kleine

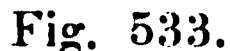
Differenz in der angegebenen Stimmung, und das Phonogramm muß also das Bild von Stößen zeigen, mithin ein Abnehmen und Anwachsen in der Höhe und Tiefe der Wellenberge und Täler, Weise ein Schreibfederchen derart befestigt, dass es auf der berußten Fläche seine Spur zurückläßt, wenn die Stimmgabel *B* über das Brettchen *d* abgezogen wird.

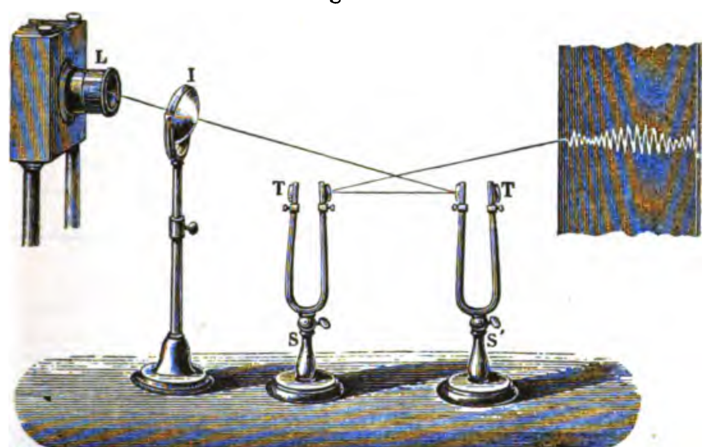
Fig. 532.



Frage 992. Mit Hilfe welches Apparates läßt sich die Kombination zweier parallelen Schwingungsrichtungen von zwei Stimmgabeln nach dem Prinzipe der optisch-akustischen Methode einem größeren Hörerkreise vorführen?

Antwort. Mit Hilfe des Apparates von Lissajous, dessen Versuchsanordnung die Figur 533 zeigt. Das aus einer Oeffnung *L* der elektrischen Lampe austretende Strahlenbündel wird durch die Konvexlinse *I* etwas konvergent gemacht, so dass auf einem entfernten Schirme ein scharfes Bild der Oeffnung entsteht. Bevor das Strahlenbündel dahin gelangt, wird es in der aus der Figur ersichtlichen Weise von den Spiegeln der beiden Stimmgabeln *T* und *T'* reflektiert. Zu diesem Behufe trägt das obere Ende einer jeden Stimmgabel an der äußeren Seite einen ebenen Metall- oder Glasspiegel, und an der symmetrischen Stelle der zweiten Zinke, ebenfalls nach außen, ein gleichgeformtes Gegengewicht. Wird nur eine Gabel zum Schwingen gebracht, so wird der Lichtpunkt auf dem Schirme zu einer vertikalen Lichtlinie verlängert. Dieselbe wird zu einer horizontalen Kurve ausgezogen, wenn man statt des Schirmes einen um eine vertikale Achse rotierenden Spiegel anwendet (Siehe Fig. auf Seite 93 des


Fig. 533.



Erkl. 920. a) Schwingen die beiden Gabeln so, dass ihre Spiegel dabei stetst p a r a l l e l bleiben, d. h. beginnen sie gleichzeitig ihre Bewegung nach d e r s e l b e n Seite hin, und haben sie dieselbe Schwingungsphase und Schwingungsweite, so zeigt das reflektierte Bild auf dem weißen Schirme ein Minimum der Ausdehnung, d. h. einen L i c h t p u n k t.

b) Schwingen die beiden Gabeln derart, dass zwar beide Spiegel gleichzeitig durch ihre Ruhelage gehen, aber nach e n t g e g e n g e s e t z t e n Seiten, d. h. gegeneinander, so zeigt sich das zurückgeworfene Licht im Maximum der Ausdehnung, d. h., als S t r i c h von der möglichst g r ö ß t e n Länge.

c) Passieren die Spiegel n i c h t g l e i c h z e i t i g die Ruhelage, so liegt die Länge des Bildes zwischen dem erwähnten Maximum und Minimum und ist unabhängig von der Differenz der Schwingungsphasen. Das Bild zeigt sich folglich als mehr oder weniger gerader Strich.

Wird der Einklang der beiden Gabeln etwas gestört (etwa dadurch, dass man an die eine Zinke der Gabel ein kleines Stückchen Wachs klebt), so dehnt sich der Lichtpunkt nacheinander zur größten Geraden aus und zieht sich wieder zum Kleinsten zusammen. Die größte Ausdehnung der Lichtgeraden fällt mit den Stößen (s. d.) zusammen, und da die Anzahl derselben für die gleiche Zeit dem Unterschiede der Tonhöhen proportional ist, so kann durch Beobachtung der Lichterscheinungen die Differenz zweier naheliegenden Töne ohne Hilfe des Ohres beurteilt werden. Und weil dabei für die verschiedenen Ton-Intervalle und Schwingungsphasen je andere Lichtfiguren auftreten, so kann der Beobachter aus der Figur auch das Tonverhältnis und den Phasenstand absehen.

ersten Bandes der Akustik). Noch einfacher ist es, die Stimmgabel T selbst ein wenig um ihre vertikale Achse zu drehen. Schwingt nun auch die zweite Gabel, so wird die Amplitude des schwingenden Lichtpunktes (wenn beide Gabeln nicht unisono gestimmt sind) periodisch veränderlich.

---

b) Die Zusammensetzung zweier zueinander senkrechten Schwingungsbewegungen.

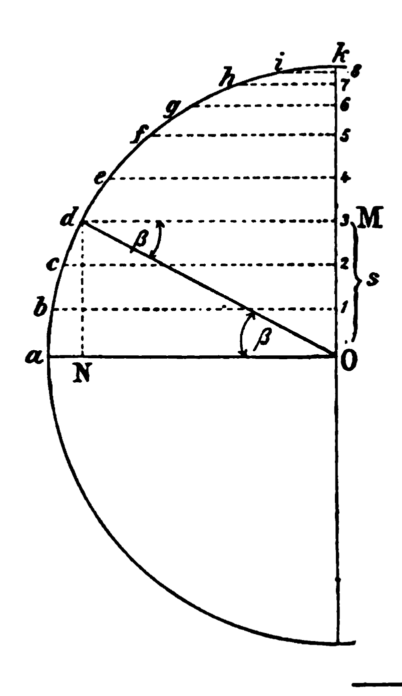
Frage 993. Von ganz besonderer Wichtigkeit ist die Zusammensetzung solcher Schwingungen, deren Richtungen auf einander senkrecht stehen. Um die Bahn eines Punktes konstruieren zu können, auf welchen zwei solche Schwingungen zugleich einwirken, müssen wir uns zunächst erinnern, dass die geradlinig schwingende Bewegung eines Punktes, in welchen Beziehungen zu der gleichförmigen Bewegung in kreisförmiger Bahn steht?

Erkl. 921. Da wir in Fig. 534 den $\frac{1}{4}$ Kreis in 9 (n) gleiche Teile zerlegt haben, was auf den ganzen Umfang 36 Teile beträgt, so kommt der schwingende Punkt, wenn wir die Schwingungsdauer mit T bezeichnen, nach $1/36\ T$ bis Punkt 1, nach $2/36\ T$ bis Punkt 2, . . . nach $9/36\ T$ bis Punkt k, von wo aus, nach

Antwort. Wie bereits im ersten Bande der Akustik, Seite 17 bis 19 (sowie im Lehrbuche der Dynamik, S. 392 u. f.) bemerkt worden ist, können wir die Orte eines geradlinig schwingenden Punktes, welche er in den einzelnen Zeitteilchen einer vollen Schwingung auf seiner Bahn passiert, dadurch erhalten, daß wir einen Kreis zeichnen (Fig. 534), auf dessen Umfange eine bestimmte Anzahl gleicher Teile abtragen und durch die Teilpunkte parallele Hilfslinien zeichnen, die zur Schwingungsrichtung senkrecht stehen. Wenn nun ein Punkt a der Kreisbewegung in gleichen aufeinander folgenden Zeitabschnitten die gleichen Bogenlängen ab, bc, cd usw. beschreibt, so legt der durch den senkrechten Durchmesser schwin-

momentanen Stillstande, die nach dem Zentrum 0 rückwärts gehende Schwingungsbewegung stattfindet.

Fig. 534.



gende Punkt 0 in denselben Zeitabschnitten geradlinig die Wege 0 bis 1, 1 bis 2, 2 bis 3 usw. zurück.

Für eine in der Richtung des horizontalen Durchmessers stattfindende schwingende Bewegung lassen sich die einzelnen Punkte der Bahn in gleicher Weise durch vertikale Parallelen, von den Teilpunkten der Peripherie aus, ermitteln. Finden nun die Schwingungen in vertikaler und horizontaler Richtung zugleich statt, so brauchen wir nur nach den Gesetzen des Bewegungsparallelogramms (siehe Seite 209, Satz 3) diejenigen Durchschnittspunkte aufzusuchen, welche sich als die Bahnpunkte des in der Richtung der Resultierenden bewegten Punktes nach je $1/n$ der Schwingungsdauer ergeben.

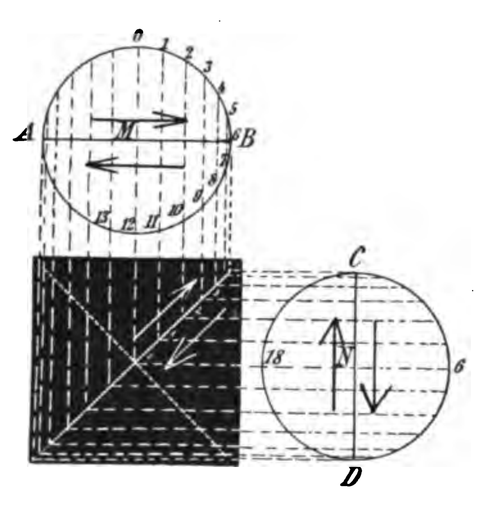
Frage 994. Wie müssen wir nun verfahren, um auf dem Wege der Konstruktion die Bahn eines Punktes zu erhalten, welcher zwei zueinander senkrecht stehenden Schwingungsbewegungen von gleichen Schwingungszeiten und gleichen Schwingungsphasen unterworfen ist?

Erkl. 922. Ist die Phasendifferenz gleich ½, d. h. beginnt die eine Schwingung erst, nachdem die andere bereits halb vollendet ist, so erhält man ebenfalls eine gerade Linie, welche aber die in Fig. 535 punktiert gezeichnete Lage hat. Die vertikale Bewegung ist in diesem Falle bis N zurückgekehrt und gibt mit der in diesem Momente beginnenden Rechtsbe-

Antwort. Wir nehmen auf den Schenkeln eines rechten Winkels MON Figur 535 zwei Punkte M und N an, und beschreiben um dieselben als Mittelpunkte Kreise mit gleichen Radien (die gleich der halben Amplitude beider Schwingungsbewegungen sind), deren Peripherien wir in eine beliebige Anzahl z. B. 24 gleiche Teile bringen. Fällen wir von diesen Teilpunkten aus Lote auf den durch M gelegten horizontalen, sowie auf den durch N gelegten vertikalen Durchmesser, so geben die Schnittpunkte der aus den beiden zugeordneten Punkten beider Kreise gefällten Senkrechten in ihrer Gesamtheit die resultierende Schwingung.

wegung von M aus, die rechts abwärts gerichtete Diagonale als Resultierende.

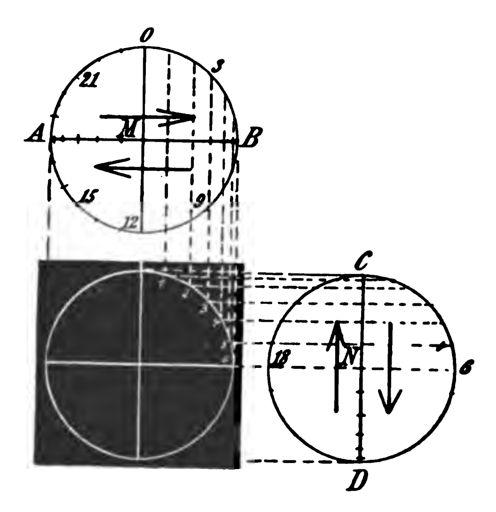
Fig. 535.



Lassen wir z. B. die horizontale Schwingung, von der Mitte beginnend, nach rechts gehen, die vertikale, ebenfalls von der Mitte beginnend, nach aufwärts, so erhalten wir als Punkte der resultierenden Bahn nach 1/24, 2/24, 3/24, usw. der Schwingungsdauer die in Fig. 535 mit 0,1,2 . . . bezeichneten Punkte, deren Verbindungslinie die Diagonale eines Quadrats bildet. Die Schwingung erfolgt also diesmal in einer in sich zurückkehrenden geraden Linie.

Frage 995. Welche resultierende Schwingungskurve erhalten wir, wenn wir bei gleichen Schwingungszeiten eine Phasendifferenz von ¼ T annehmen?

Fig. 536.

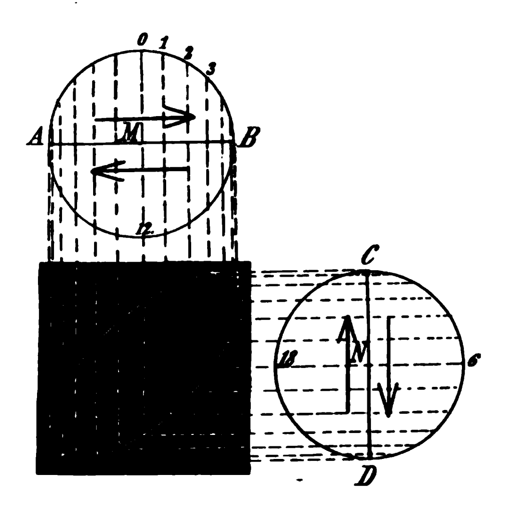


Antwort. Angenommen, die Vertikalbewegung habe ihren höchsten Punkt C erreicht (Fig. 536) und nun erst beginne die Horizontalbewegung vom Mittelpunkte nach rechts. Indem sich dieselbe mit der gleichzeitig beginnenden Bewegung nach abwärts zusammensetzt, erreicht sie nach 1/24, 2/24, 3/24 T usw. die Punkte 1, 2, 3 . . ., durch deren kontinuierliche Verbindung derselbe Kreis entsteht, der zur Konstruktion des Punktsystems gedient hat.

Beträgt die Phasendifferenz ¾ T, so entsteht derselbe Kreis, jedoch durchläuft ihn der schwingende Punkt in entgegengesetzter Richtung.

Frage 996. Welche resultierende Schwingungskurve erhalten wir, wenn zwei zueinander senkrechte Schwingungen von gleicher Schwingungszeit bei einer Phasendifferenz von $^1/_8$ oder $^3/_{24}$ T auf ein und denselben Punkt wirken?

Fig. 537.



Antwort. Wir denken uns die vertikale Bewegung bereits um 3 Teilstriche ($= 24 \cdot {}^1/_8$) vom Mittelpunkte nach aufwärts gerückt, während die horizontale Bewegung von der Kreismitte nach rechts beginnt. Durch Kombination der fortschreitenden Bewegungen finden wir dann die Punkte 0, 1, 2, 3 . . ., durch deren Verbindung wir eine Ellipse erhalten.

Dieselbe Ellipse, jedoch in umgekehrter Richtung durchlaufen, finden wir für die Phasendifferenz von $^7/_8$ oder $^{21}/_{24}$ T. Den Phasendifferenzen $^3/_8$ und $^5/_8$ T entspricht die punktiert gezeichnete Ellipse.

Frage 997. Durch entsprechende Konstruktionen können wir uns leicht überzeugen, dass auch allen übrigen Phasendifferenzen mehr oder weniger gestreckte Ellipsen

Fig. 538.

a e b c d

Antwort. Diese resultierenden Kurven (oder sogenannten „Lissajous'schen Figuren") sind im allgemeinen Ellipsen. Geht man von der Phasendifferenz 0 allmählich zu größeren Phasendifferenzen über ,so geht die anfänglich gerade Linie in eine sehr gestreckte Ellipse über, die sich immer mehr dem Kreise nähert, dann Kreis wird, hierauf in eine Ellipse entgegengesetzter Richtung und endlich wieder in eine Gerade verwandelt, aus welcher dann wieder eine stark exzentrische Ellipse mit entgegengesetzter Rotationsrichtung hervorgeht, die sich wieder zum Kreise erweitert, um bei dem weiteren Verlaufe wieder zur ur-

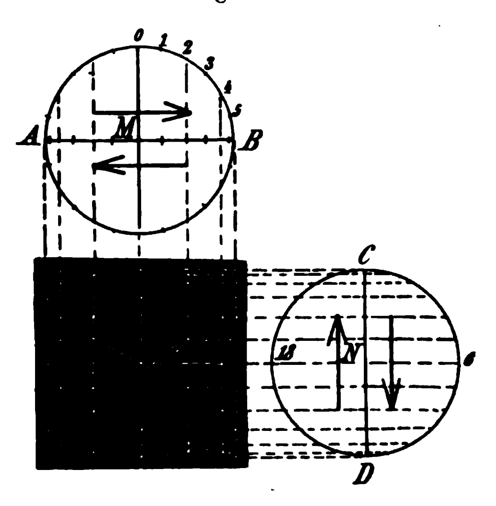
entsprechen. Welcher allgemeine Satz ergibt sich hieraus in Bezug auf die Form der resultierenden Kurven, für den Fall, dass zwei Tonquellen, deren Schwingungsrichtungen senkrecht zueinander stehen, miteinander genau i m E i n k l a n g sind?

sprünglichen Geraden zusammenzufallen. Siehe die Reihe der Fig. 538 von links nach rechts, an welche sich dieselbe Reihe von rechts nach links (aber in umgekehrter Rotationsrichtung anschließt.

Ersl. 923. Sind die beiden kombinierten Schwingungsbewegungen von gleicher Dauer, aber von verschiedener Schwingungsweite (Amplitude), so werden die Figuren mehr in die Länge gezogen erscheinen, und dann erscheint auch der Kreis als Ellipse, wie es in der beistehenden Figur *c* angedeutet ist.

Frage 998. Die vorerwähnte Konstruktionsart wird auch in den Fällen angewandt, wo die beiden Schwingungszeiten ein anderes Verhältnis haben. Wie gestalten sich nun die Kurven, welche entstehen, wenn die eine von zwei Stimmgabeln, z. B. die horizontal schwingende die nächst höhere Oktave der andern angibt, also d a s S c h w i n g u n g s v e r h ä l t n i s 1 : 2 besteht, und wir gleiche Amplituden voraussetzen?

Fig. 539.



Antwort. Da in diesem Falle die Schwingungen in horizontaler Richtung doppelt so schnell vor sich gehen, als die in vertikaler Richtung, so gehen wir in horizontaler Richtung stets z w e i Punkte (von den 24 Teilpunkten) weiter, sobald wir in vertikaler Richtung um je e i n e n Punkt auf oder absteigen. Ziehen wir also von sämtlichen ungeradzahligen Punkten der Horizontalreihe vertikale Parallelen, sowie von sämtlichen Punkten der Vertikalreihe horizontale Parallelen, so geben die Schnittpunkte derselben die resultierende Kurve. Dieselbe bildet, wenn beide Bewegungen von den Mittelpunkten der Hilfskreise ausgehen, also d i e P h a s e n d i f f e r e n z g l e i c h N u l l oder ½ ist, die Form einer 8, gezeichnet in der Richtung des Pfeiles, siehe Fig. 539. Bei den Phasendifferenzen ¼ und ¾ entsteht dieselbe Kurve, aber in einer dem Pfeile entgegengesetzten Richtung. Die in sich selbst zurückkehrende gestrichelte Kurve der Fig. 539 entsteht bei den Phasendifferenzen

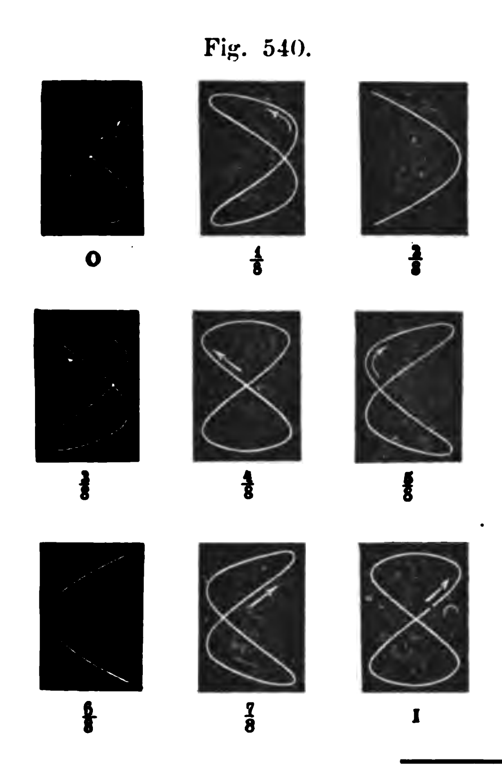


Fig. 540.

von $^1/_8$ und $^5/_8$ T. Außerdem entstehen bei den Phasendifferenzen $^3/_8$ und $^7/_8$ T, die dem Spiegelbilde der gestrichelten Kurve entsprechenden Figuren. Für die dazwischen liegenden Phasendifferenzen erhält man Figuren, welche eine mehr oder weniger verschobene 8 vorstellen, (siehe die nebenstehenden Figuren).

Frage 999. Schwingt die eine horizontale Stimmgabel d r e i m a l so schnell als die vertikale, so gibt sie die D u o d e z i m e von dem Tone der vertikalen Gabel. Wie erhalten wir in diesem Falle die zugehörige Lissajous'sche Figur auf dem Wege der Konstruktion?

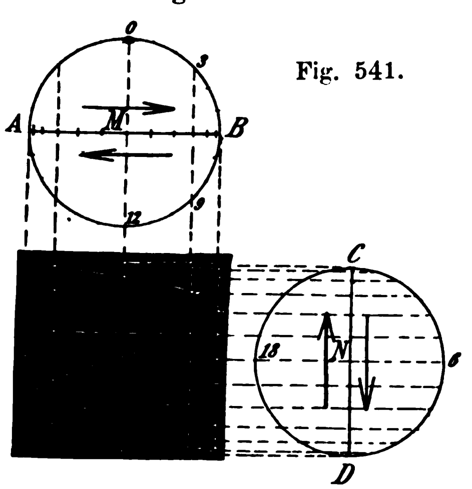
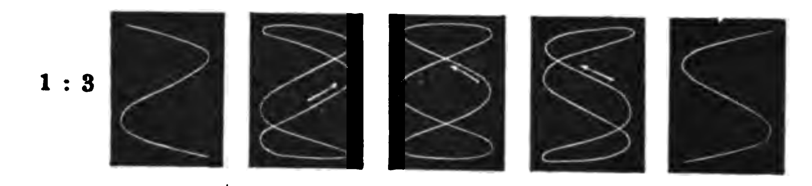


Fig. 541.

Antwort. Wir erhalten die resultierende Kurve, indem wir von den Punkten des horizontalen Durchmessers nur jeden dritten berücksichtigend, Lote ziehen, während von jedem Punkte des vertikalen Diameters Horizontalen gezogen werden; die Schnittpunkte dieser Liniensysteme geben das Bild der resultierenden Kurve. In der nebenstehenden Figur 541 entspricht die ausgezogene Linie den Phasendifferenzen 0, 1/3, 2/3. Ihr Spiegelbild entsteht bei den Phasendifferenzen 1/6, 3/6 und 5/6 T (wenn T die Schwingungsdauer für die vertikale Komponente bedeutet). Die symmetrische, gestrichelt gezeichnete Figur entsteht in der Richtung des Pfeiles bei den Phasenunterschieden 1/12, 5/12 und 9/12, in entgegengesetzter Rich-

tung bei den Phasenunterschieden 3/12, 7/12 und 11/12. Die Reihenfolge der Figuren für zunehmende Phasenunterschiede ist aus der Fig. 542 ersichtlich.

Fig. 542.



Frage 1000. Durch welches Verfahren erhalten wir aber die resultierende Schwingungskurve, wenn die Schwingungszahlen der beiden rechtwinklig zueinander stattfindenden Schwingungsbewegungen im Verhältnis 2 : 3 stehen, also dem Intervalle der Q u i n t e entsprechen?

Antwort. In diesem Falle überspringen wir von der vertikalen Reihe je einen, von der horizontalen Reihe je zwei Punkte, so dass die Anzahl der gleichzeitig zurückgelegten Wegstücke im Verhältnis 2 : 3 steht. Die in Fig. 543 ausgezogene Kurve entsteht bei den Phasendifferenzen 0, 2/6, 4/6, in der Richtung des Pfeiles, bei den Phasendifferenzen 1/6, 3/6, 5/6, in entgegengesetzter Richtung. Die gestrichelte Figur entsteht bei den Phasendifferenzen 1/12, 5/12, 9/12; ihr Spiegelbild bei den Phasendifferenzen 3/12, 7/12 und 11/12. Die ganze Reihenfolge der Figuren für zunehmende Phasendifferenzen zeigt Fig. 544.

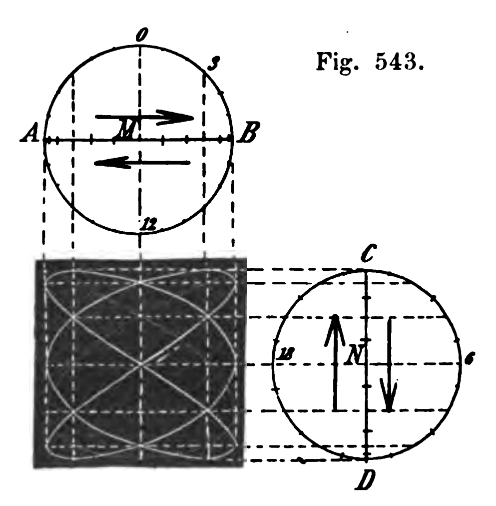


Fig. 543.

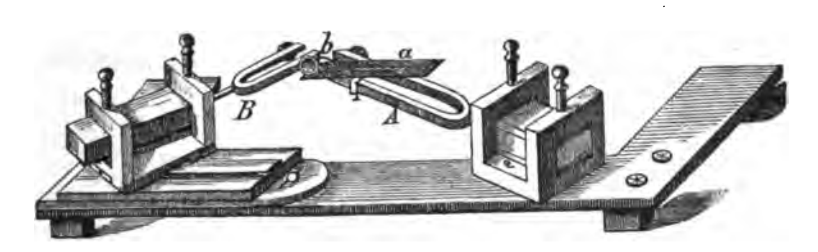
Fig. 544.

2 : 3

Frage 1001. Wir haben aus den vorstehenden Zeilen ersehen, in welcher Weise die resultierenden Kurven zweier zueinander senkrechten Schwingungsbewegungen auf dem Wege der Konstruktion gefunden werden können; mittelst welcher Apparate lassen sich dieselben Kurven auf dem Wege des Experiments anschaulich machen?

Antwort. Für die Kombination zweier zueinander senkrechten Schwingungsbewegungen, welche in zwei verschiedenen Körpern erfolgen, können wir uns zunächst desselben Apparates bedienen, den wir schon auf Seite 215 beschrieben und in Figur 531 dargestellt haben. Da aber der dort beschriebene Apparat für die Kombination zweier p a r a l l e l e n Schwingungsbewegungen bestimmt war, so müssen wir an demselben eine kleine Aenderung vornehmen, um mittelst desselben auch die Kurven z u e i n a n d e r s e n k r e c h t e r Schwingungsbewegungen aufzeichnen zu können. Zu diesem Zwecke wird nämlich die feste Stimmgabel A (Fig. 545) von ihrem für die parallele Kombination bestimmten Orte abgeschraubt und an einer zweiten für die rechtwinklige Kombination berechneten Stelle befestigt. Alles übrige ist aus der Zeichnung ersichtlich, wobei zu bemerken ist, dass die bewegliche Gabel B längs einer erhabenen, hölzernen Schiene läuft, welche an der Basis ihres hölzernen Trägers eingeschnitten ist.

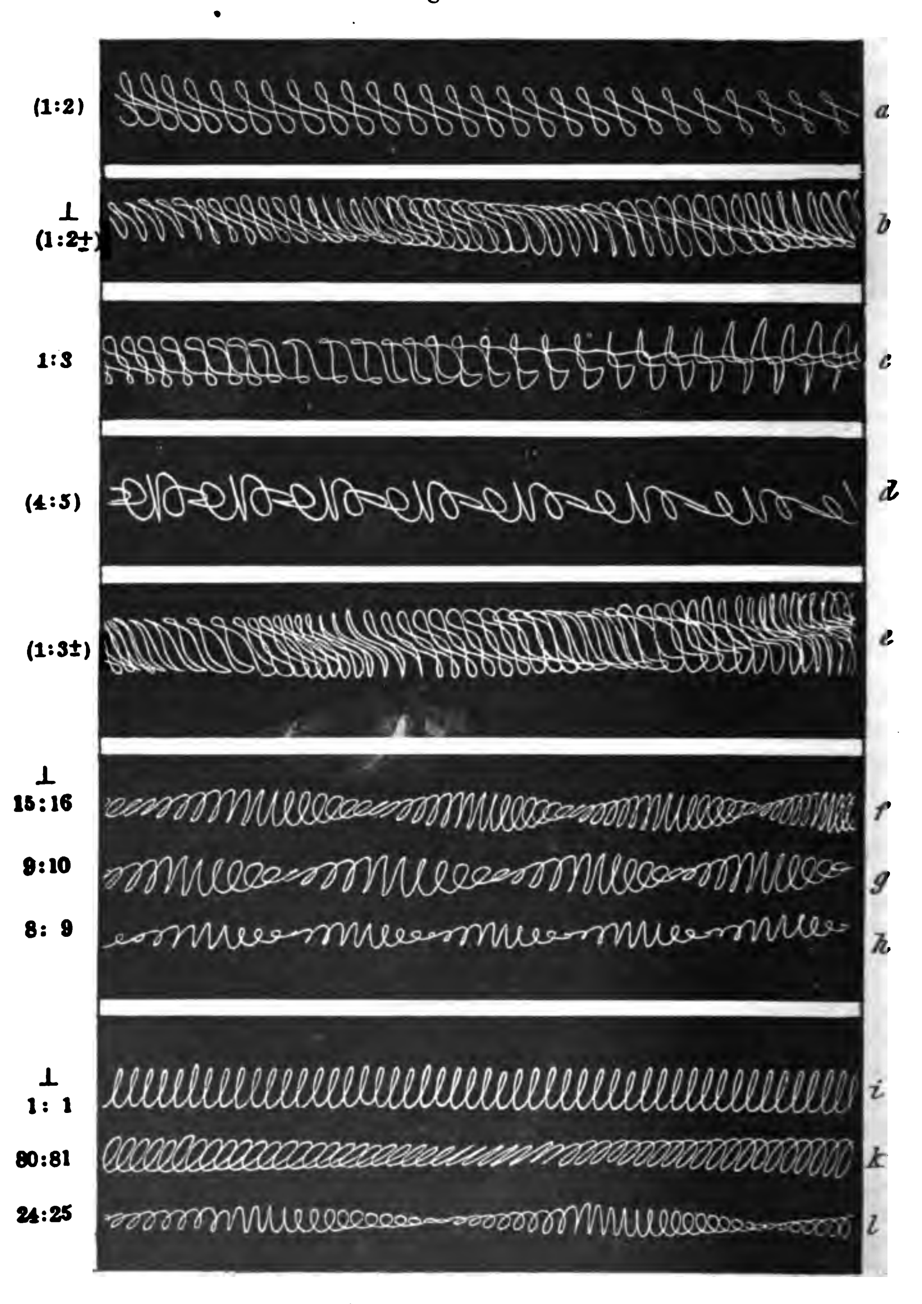
Fig. 545.



Erkl. 924. Die schreibende Federspitze muß stets p a r a l l e l zur Längsrichtung der Schreibfläche, d. i. des berußten Glas- oder Papierstreifens, also senkrecht zur Achse der schwingenden Zinke A liegen. Um die schreibende Gabel genau auf die feste richten zu können, läßt sich das Fußbrett der Gabel B seitlich verschieben und dann festmachen. Zur Regulierung der gegenseitigen Höhe der Gabeln dienen verschieden hohe Holzklötzchen, mit deren Hilfe man die schreibende Gabel in ihrem Träger so hoch über der festen Gabel anbringt, dass sie sich vollständig frei bewegen kann. Eine Reihe solcher Tonzeichnungen wie sie der Apparat durch Kombination senkrechter Schwingungen liefert, sind Figur 546 abgebildet. Die nebenstehenden Ziffern geben das Schwingungsverhältnis an, wobei ein hinzugefügtes ± Zeichen eine nicht vollkommen reine Stimmung andeutet. Diese Tonschriften können

auch einem großen Zuhörerkreise mittelst eines Projektionsapparates vorgeführt werden. (Siehe Lehrbuch der Optik).

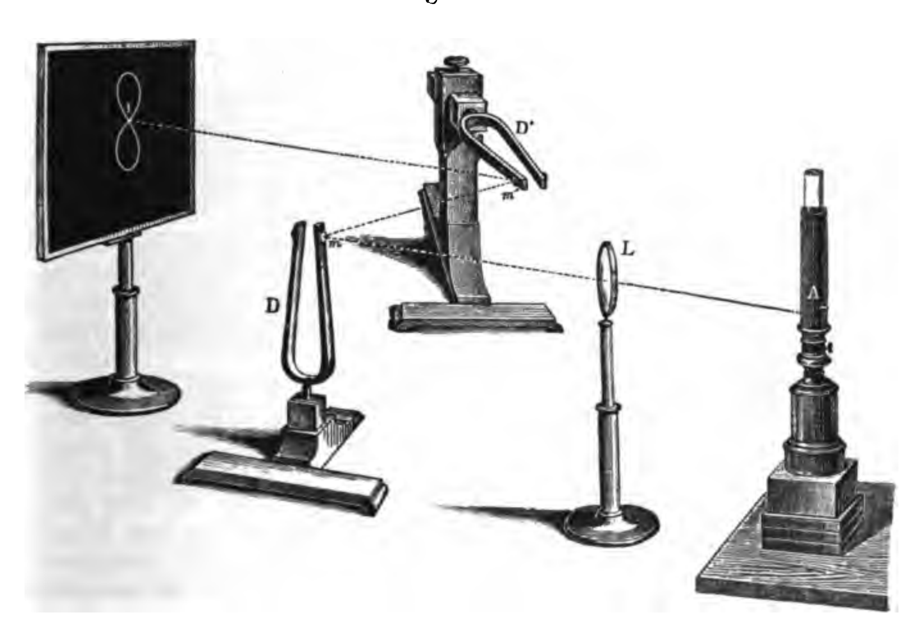
Fig. 546.



Frage 1002. Welches anderen Apparates können wir uns bedienen, um nach der optisch-akustischen Methode die zueinander rechtwinkligen Schwingungen von zwei Stimmgabeln zu verbinden?

Antwort. Wir benutzen zu diesem Zwecke den von Lissajous angegebenen Apparat, in der Anordnung, wie sie in der Figur 547 dargestellt ist. Von einer intensiven Lichtquelle (Erkl. 925) A geht ein schmales Strahlenbündel durch die Sammellinse L und fällt in konzentriertem Strahle auf das Spiegelchen m einer vertikal stehenden großen Stimmgabel D. Der Strahl wird reflektiert und trifft auf seinem Wege das Spiegelchen m' einer zweiten, horizontal liegenden Stimmgabel D', wodurch der Strahl, abermals reflektiert, auf einen Schirm fällt und dort einen hellen Lichtpunkt zeichnet, so lange die beiden Gabeln im Zustande der Ruhe sind. Wenn wir nun den Ton der vertikalen Stimmgabel erregen, während die horizontale in Ruhe bleibt, so dehnt sich der Lichtpunkt zu einem hellleuchtenden langen vertikalen Streifen aus. Lassen wir die

Fig. 547.



Erkl. 925. Wenn die herrlichen Lichtfiguren bei der optisch-akustischen Methode einer größeren Versammlung vorgeführt werden sollen, so müssen wir uns eines Projektionsapparates mit elektrischem oder Kalklicht bedienen. Für diesen Fall müssen wegen der bei Glasspiegeln auftretenden kräftigen Nebenbilder Metallspiegel angewandt werden. Gewöhnliche Glasspiegel eignen sich mehr für den einzelnen Beobachter unter Anwendung eines schwächeren Lichtes. Das Lampenglas wird dann mit einem Blechzylinder bedeckt, der eine kleine Seitenöffnung besitzt, durch welche das Licht auf die Spiegel der Stimmgabeln geleitet wird. Bei großer Schwingungsweite kann man dann die Bilder direkt in den Spiegeln ansehen. Bei geringer Schwingungsweite, oder behufs einer genaueren Beobach-

tung, betrachtet man die Erscheinung mit einem Fernrohre.

Erkl. 926. Je nach dem verschiedenen Tonverhältnis, in welchem die beiden Stimmgabeln zueinander stehen, zeigen sich die verschiedensten, regelmäßigen und herrlich anzusehenden Kurven, welche für das Tonverhältnis ½ d. i. für die Oktave schon in Figur 540, sowie für das Verhältnis $^1/_3$ und ⅔ in Figur 542 resp. 544 dargestellt sind, während die nebenstehende Fig. 548 die Kurvenreihe für das Tonverhältnis ¾ oder die Quarte wiedergibt. Die beigesetzten Pfeile deuten die

Fig. 548.

Richtung der Lichtbewegung an. Die unter die Figuren gesetzten Zahlen bezeichnen die Phasenunterschiede. Auch hier kann man aus der konstant bleibenden Form und Lage der Figur auf den reinen Zusammenklang schließen. Die folgenden drei Reihen der Figur 549 stellen die den Intervallen 3 : 5, 4 : 5, 5 : 6, d. i. große Sexte, große

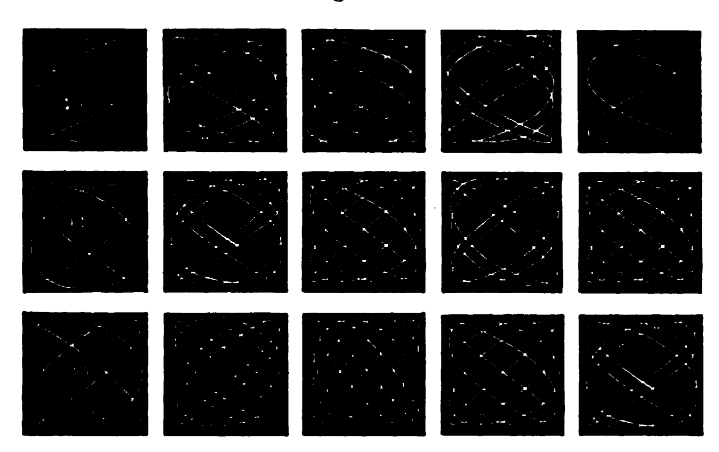
zweite Gabel allein schwingen, während die Gabel *D* in Ruhe bleibt, so zeichnet der Lichtpunkt eine Horizontallinie auf den Schirm. Versetzen wir aber beide Gabeln in Schwingungen, und sind dieselben in vollkommenem Einklange (1 : 1), so erblicken wir auf dem Schirme eine Ellipse, deren Form von dem Phasenunterschiede beider Gabeln abhängt. Bei der Phasendifferenz 0, ½ und 1 geht diese Ellipse in eine gerade Lichtlinie über. Beim vollkommenen Einklange der Gabeln behält die ursprüngliche Lichtlinie ihre Form und Lage bei, ist jedoch der genaue Einklang nur im geringsten gestört, so wird die Ellipse nach und nach alle Formen annehmen, welche den einzelnen Phasenunterschieden entsprechen. Schieben wir z. B. ein kleines Gewicht auf der Zinke der einen Gabel entlang, oder kleben wir ein Stückchen Wachs an eine der Gabeln, so stören wir den Einklang, und die Figur geht langsam aus einer geraden Linie in eine schräge Ellipse und von da in einen Kreis über, worauf sie sich abermals zu einer Ellipse von entgegengesetzter Achsenrichtung zusammenzieht und alsdann zu einer geraden Linie wird, deren Richtung im rechten Winkel zur ersten steht; und schließlich geht sie in umgekehrter Richtung durch dieselbe Reihe von Figuren wieder zu der geraden Linie zurück, mit der die Lichtfigur begonnen hat. (Siehe Fig. 538.)

Die Zeit, welche nötig ist, bis eine dieser Figuren sich genau wiederholt, entspricht der Zeit, die eine Gabel braucht, um der anderen um eine ganze Schwingung vorauszukommen. Belasten wir die eine Gabel noch mehr, so erhalten wir noch rascheren Wechsel, so dass die gerade Linie, die Ellip-

Terz und kleine Terz entsprechenden Figuren dar. Die Stimmgabeln des vorstehend beschriebenen Apparates haben solche Dimensionen, dass sie große und lange anhaltende Schwingungen ausführen. Die Schenkel derselben sind bis zu 22 cm lang, 5 mm dick und 10 mm breit.

se und der Kreis in rascher Folge durcheilt werden. Wenn wir bei Ausführung des beschriebenen Versuches den Spiegel der Horizontalgabel um einen kleinen Bogen drehen, so ziehen wir den festen Kreis zu einer leuchtenden Spirale aus, welche sich quer über

Fig. 549.

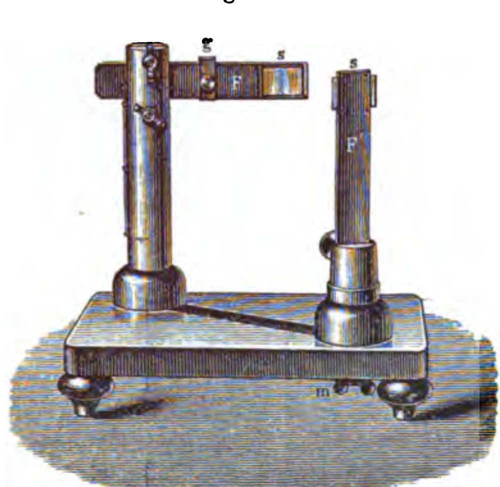


den Schirm ausdehnt, und mit der Kurve *i* in Figur 546 übereinstimmt. Auch die übrigen in Fig. 546 dargestellten Spiralen erhalten wir in gleicher Weise, wenn wir Stimmgabeln anwenden, deren Schwingungsverhältnis mit dem den betreffenden Kurven vorgedruckten Ziffern übereinstimmt.

Frage 1003. Welche wesentlich vereinfachte Form hat Pfaundler dem oben beschriebenen sog. König'schen Apparate gegeben?

Antwort. Der von Pfaundler konstruierte Apparat ist in Fig. 550 abgebildet, und enthält anstelle der Stimmgabeln zwei federnde Stahlstreifen F und F', die mit zwei Spiegeln s und s' versehen sind. Die Säulen, welche die Federn tragen, sind drehbar und können längs des schiefen Schlitzes im Fußbrett einander genähert und mittelst der Flügelschrauben m befestigt werden. Die Schwingungsdauer der Federn wird entweder

Fig. 550.



durch Anbringung oder Verschiebung von Laufgewichten g oder (bei der horizontalen Feder) durch Verstellen derselben im Einschnitte der Tragsäule reguliert. Man beobachtet auch hier die Kurven entweder direkt oder mittelst Projektion an eine Wand. Klopft man mit einem harten Gegenstande auf die Mitte der Federn, so entstehen schön gekräuselte Figuren, welche von den Obertönen herrühren, die durch die Unterabteilung der Stahlstreifen in mehrere schwingende Partien hervorgerufen werden.

Frage 1004. Welche Vorteile gewährt die Anwendung der optisch-akustischen Methode?

Erkl. 927. Wolf wandte das Lissajous'sche Prinzip auf die Zungenpfeifen an. Die Schwingungsebenen der Zungen werden senkrecht gegeneinander gestellt. Die freien Enden der Zungen sind silberpoliert oder mit kleinen Spiegelchen versehen. Bei vollkommener Konsonanz der betreffenden Töne ruht die Lichtfigur; bei Störung der Konsonanz rotiert sie nach rechts oder links.

Erkl. 928. Statt der gebräuchlichen Stimmgabeln verwendet H. J. Oosting zwei zu Torsionsschwingungen geeignete Metalldrähte, von denen der eine horizontal, der andere vertikal gespannt ist. Beide Drähte sind in der Mitte mit einem Spiegelchen versehen; bringt man

Antwort. 1) Das optisch-akustische Verfahren verwandelt die akustische Erscheinung in eine optische, und da das Hören dabei nicht ausgeschlossen ist, so können wir bei dieser Methode sowohl mit dem Auge als mit dem Ohre die resultierenden Schwingungen wahrnehmen.

2) Diese Methode ermöglicht das experimentelle Studium der Schwingungsweiten und Phasenzustände tönender fester Körper.

3) Mittelst dieser Methode läßt sich das genaue Stimmen von Gabeln auch mit unmusikalischem Ohre zustande bringen.

4) Durch die optische Methode wurde nachgewiesen, dass die Stöße (oder Schwebungen) zweier Gabeln von dem Aufeinanderwirken der Luftwellen (aber nicht, wie Savart meinte, von ihrer gegenseitigen Einwirkung herrühren.

5) Durch die optische Methode wurde festgestellt, dass der Resonanzkasten auf die Tonhöhe keinen Einfluß hat. Die Figuren bleiben nämlich bei Wegnahme der

diese Spiegelchen aus der Ruhelage, so schwingen sie in zwei zueinander senkrechten Flächen. Zur Regulierung der Schwingungszeit ist an der Hinterseite jedes Spiegelchens ein horizontaler Kupferstab befestigt, auf welchem zwei Gewichtsstückchen mit Schraubenbewegung verschiebbar sind. Werden die Gewichtchen nach außen geschraubt, so vergrößert sich die Schwingungszeit. Läßt man bei dem einen Drahte die Gewichtchen ganz weg, so kann man durch Verschiebung am anderen Spiegel das Schwingungsverhältnis zwischen 1 : 1 und 1 : 2 beliebig verändern. (Wiedemanns Annalen, 33, 1888, S. 415.)

Stimmkästen und Wiederersatz derselben ungeändert.

6) Die Schwingungsdauer einer Stimmgabel wächst um etwas, wenn ihre Schwingungsweite zunimmt. Die Schwingungen der nicht konstanten Lichtfiguren werden nämlich langsamer, wenn man die höher gestimmte Gabel mit einem Violinbogen streicht und dadurch in stärkere Schwingungen versetzt. Umgekehrt verhält es sich, wenn die tiefere Gabel zu weiteren Schwingungen veranlaßt und dadurch der Unterschied beider Gabeln vergrößert wird.

Frage 1005. An welchem Merkmale kann man für die komplizierteren Lichtfiguren das Intervall der vereinigten Schwingungen erkennen?

Erkl. 929. Wenn der Einklang gestört ist und die Figuren rasch alle Phasen durchmachen, kann es kommen, dass das letzte Bild auf der Netzhaut noch nicht erloschen ist, während das zweite oder dritte auftritt. Aus der Zahl der gleichzeitig auftretenden Figuren kann man die Dauer des Lichtreizes auf der Netzhaut berechnen. Bei mittlerer Tageshelle beträgt die Nachdauer $^1/_7$ Sekunde.

Bei mässigem Lichte ist die Nachwirkung der weißen Farbe 0,1" die der gelben Farbe nur 0,09".

Antwort. Wenn die Figur ganz ausgebildet ist, so drückt die Anzahl der Gipfelpunkte längs der senkrechten und wagerechten Seiten der Figur das Verhältnis der vereinigten Schwingungen aus. Bei der Oktave z. B. (Fig. 540) haben wir eine Schleife in einer Richtung und zwei in der andern, bei der Quinte (Fig. 544) zwei Schleifen in einer Richtung und drei in der andern; bei der Quarte (Fig. 548) haben wir 3 Schleifen in einer und 4 in der andern Richtung. Ist aber das Tonverhältnis 1 : 3, so verhalten sich die leuchtenden Schleifen auch wie 1 : 3.

Frage 1006. Welches Apparates können wir uns zu optisch-akustischen Studien bedienen, für den Fall, dass der zu untersuchende Körper nicht geeignet ist, einen Spiegel zu tragen (wie z. B. eine Saite), oder wenn er aus anderen Gründen keinen bekommen darf, wie z. B. eine Normalstimmgabel, deren Ton durch Anbringung eines Spiegels vertieft werden würde?

Antwort. In allen solchen Fällen wendet man den Komparator von Lissajous an, welcher in der von H. Helmholtz vervollkommneten Konstruktion auch Vibrationsmikroskop genannt wird (siehe II. Bd. der Akustik, Seite 35). Dieser Apparat dient besonders dazu, die Schwingungsdauer einer Stimm-

Erkl. 930. Das Mikroskop besteht im allgemeinen aus einem innen geschwärzten Hohlzylinder. An das untere Ende desselben wird eine in eine Röhre gefaßte Linse angeschraubt, welche, da sie sich in der Nähe des zu vergrößernden Objektes befindet, das Objektiv genannt wird. In das obere Ende der Röhre paßt eine andere kurze Röhre, die ebenfalls eine Konvexlinse enthält, die, weil sie dem Auge zunächst befindlich ist, das Okular heißt. (Eine ausführliche Beschreibung des Mikroskops findet sich im Lehrbuche der Optik.)

gabel mit der einer Normalstimmgabel von bekannter Tonhöhe aufs Genaueste zu vergleichen. Zu diesem Zwecke ist die Normalstimmgabel A (Fig. 551) in einem passenden Stative so angebracht, dass ihre beiden Schenkel in einer Vertikalebene liegen und ihre Schwingungen in dieser Vertikalebene in der Richtung von oben nach unten vor sich gehen. Der obere Schenkel der Normalstimmgabel trägt das Objektiv eines schwach vergrößernden Mikroskopes, während an dem anderen Schenkel ein entsprechendes Gegengewicht angebracht ist. Die Stimmgabel ist so ausgeglichen, dass sie also eine bestimmte Anzahl von Schwingungen in der Sekunde macht. In Fig. 552 ist der vordere Teil der Stimmgabel A samt dem daran angeschraubten Objektive (siehe Erkl. 930) in größerem Maßstabe dargestellt.

Vor der Normalstimmgabel A wird nun die zu prüfende Stimmgabel B, etwa auf einem Resonanzkästchen befestigt, aufgestellt, und zwar so, dass die Vibrationsrich-

Fig. 551.

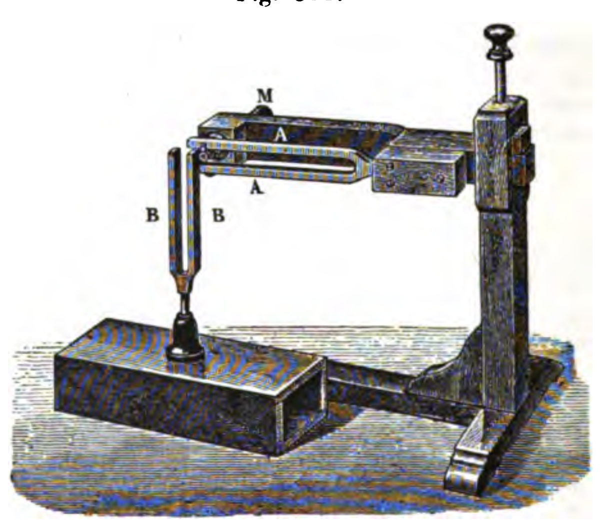
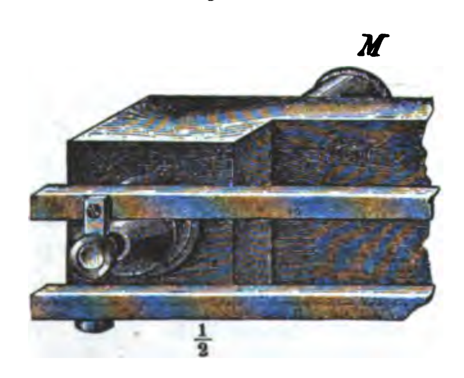


Fig. 552.



Erkl. 931. In der nebenstehend beschriebenen Weise lassen sich rasch eine große Reihe verkäuflicher Stimmgabeln mit der Musterstimmgabel vergleichen. Lissajous verglich auf diesem Wege alle in Frankreich zu verkaufenden Stimmgabeln mit einer Normalstimmgabel von 870 einfachen Schwingungen in der Sekunde. Die richtig gefundenen stempelte man unter seiner Aufsicht ab. Um die Schwingungen der Stimmgabel länger dauern zu machen, wurden dieselben durch elektromagnetischen Antrieb zum Tönen gebracht.

Bezüglich der Kombination des Grundtones einer Saite und des Tones einer Stimmgabel ist zu bemerken, dass die auftretenden Lichtfiguren den oben beschriebenen „Lissajous'schen" Figuren entsprechen; aber eine Abänderung derselben tritt ein, wenn sich harmonische Obertöne der Saite hinzugesellen. Dann erscheinen die Linien, welche die Hauptfigur bilden, gezähnt. Ist das Verhältnis der harmonischen Töne zum Grundtone ein einfaches, so läuft die Zähnung um die Hauptfigur. Ist der harmonische Ton der Saite im Einklange mit dem Stimmgabeltone, so bleibt die Zickzacklinie ruhig, die Hauptfigur aber nicht. Stimmt keiner der Saitentöne mit dem Grundtone der Gabel, dann bleiben weder die Zacken noch die Hauptfigur in Ruhe.

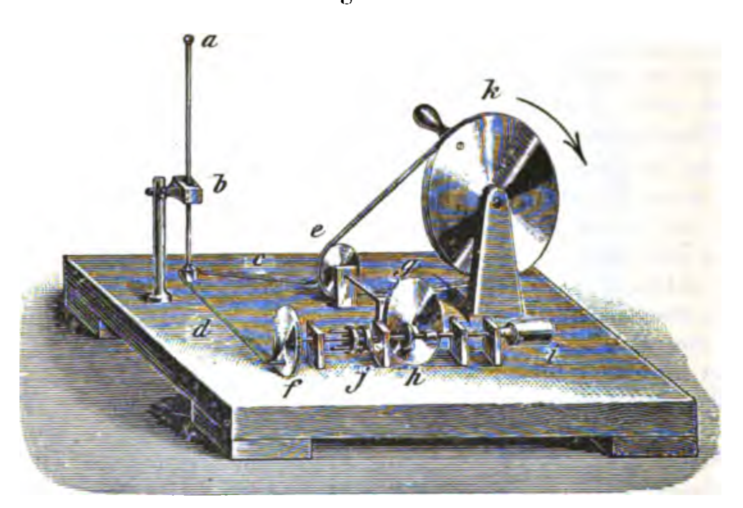
tung ihrer Schenkel horizontal, also rechtwinklig zur Schwingungsrichtung der Stimmgabel A ist. Auf dem oberen Ende des einen Schenkels, welcher gerade vor dem Objektive 0 stehen muß, ist ein Punkt p deutlich sichtbar markiert. Das Rohr des Mikroskops, dessen Objektiv an die Stimmgabel A geschraubt ist, steckt hinter diesem Objektive in einem Stative, wie in Fig. 552 deutlich zu sehen ist. Dieses Mikroskop unterscheidet sich von einem gewöhnlichen nur dadurch, dass das Objektiv nicht an der Mikroskopröhre, sondern dicht vor derselben an der Stimmgabel befestigt ist.

Sehen wir bei M in das Mikroskop, so bemerken wir das Bild des markierten Punktes p, welcher ruhig steht, wenn keine der beiden Stimmgabeln tönt. Tönt die Stimmgabel A allein, so beschreibt er eine horizontale Linie; tönen aber beide Gabeln, so beschreibt p eine Kurve, deren Gestalt von dem Intervall der Stimmgabeln abhängt. Sind die Stimmgabeln genau im Einklang, so muß der Punkt p eine der in Figur 538 gezeichneten Kurven beschreiben. Ob Ellipse, ob gerade Linie, das hängt von dem Phasenunterschiede ab. Da die Bewegung beider Gabeln nicht absolut gleichzeitig beginnen wird, so wird bei jedem neuen Versuche eine etwas andere Ellipse entstehen, welche aber dann (absolut gleiche Tonhöhe vorausgesetzt) so lange andauert, als die Gabeln ungestört fortschwingen. Ist aber die Stimmung keine absolut reine, so eilt allmählich die eine Gabel der andern voraus, es entsteht ein immer größerer Phasenunterschied, und es entstehen deshalb der Reihe nach die diesen verschiedenen Phasenunterschieden entsprechenden Figuren, welche allmählich ineinander übergehen.

Frage 1007. Welchen Apparat hat Charles Wheatstone vor vielen Jahren angefertigt, um durch Kombination rechtwinkliger Schwingungen kaleidophonische Lichtfiguren auf mechanischem Wege hervorzubringen?

Antwort. Um die kaleidophonischen Lichtkurven auf mechanischem Wege hervorzurufen, hat Wheatstone den in Figur 553 dargestellten Apparat konstruiert. a ist ein Stahlstab, der an seinem

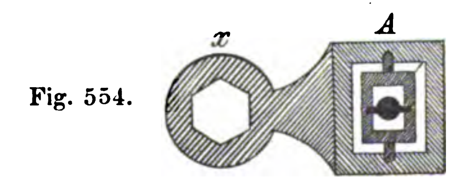
Fig. 553.



oberen Ende poliert ist, so dass er einen Lichtpunkt reflektiert; dieser Stab bewegt sich bei b in einer Kardanischen Aufhängung (siehe Fig. 554 größer und von oben gesehen gezeichnet), so dass er leicht jede Lage annehmen kann. Sein unteres Ende ist mit zwei Armen *c* und *d* verbunden, die rechtwinklig zueinander stehen und mit den kreisrunden Scheiben *e* und *f* derart exzentrisch verbunden sind, dass sie durch diese rotierenden Scheiben in eine hin- und hergehende Bewegung versetzt werden können. Die Achse der Scheibe *e* trägt am entgegengesetzten Ende eine zweite größere Scheibe *g*, durch welche die Friktionsrolle *h* in Bewegung versetzt wird; *h* sitzt auf der Achse, welche die Scheibe *f* trägt. Je nachdem diese Reibungsrolle *h* der Mitte der Scheibe *g* genähert oder von ihr entfernt wird, erteilt sie der

Erkl. 932. Die Stellschraube *i* (Fig. 553) kann die Scheibe *h* in jede beliebige Lage zwischen der Mitte und dem Rande der größeren Scheibe *g* bringen; durch die Kuppelung *j* wird die Scheibe *f* in Drehung versetzt, welche Lage sie auch haben mag. Da die Scheiben *e* und *f* derart eingerichtet sind, dass man ihre Umlaufsgeschwindigkeit im Verhältnisse wie 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, usw. also auch die hin- und hergehende Bewegung der dirigierenden Stäbchen in demselben Verhältnisse regulieren kann, so sieht man, wie die Figuren des Kugelspiegels an dem Stäbchen *a*, für verschiedene Tonhöhen-Verhältnisse hervorgerufen werden.

Fig. 554.



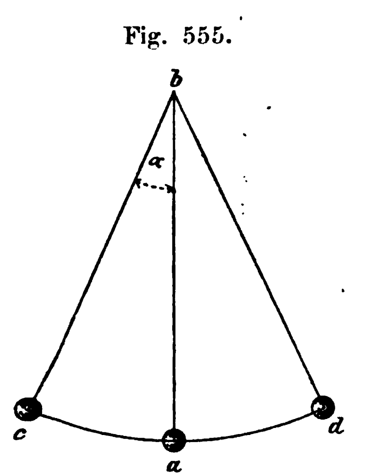
Mannigfache Phasenunterschiede bewirkt man durch Umstellung der exzentrischen Räder. Mittelst der Schraube *i* kann man die Rolle *h* an der Scheibe *g* von der Peripherie der letzteren bis zu ihrem Zentrum verschieben und dadurch die Verhältnisse zwischen den Umlaufszahlen der Scheiben *e* und *f* verändern. Für gestimmte Intervalle mit präzisiertem Gangunterschiede ersetzte König die Scheibchen *h* und *g* durch konische Zahnräder.

Die mechanischen Präzisions-Werkstätten von Ferdinand Ernecke, Berlin S. W. liefern diesen Apparat zu Mk. 65.

Scheibe *f* eine verschiedene relative Geschwindigkeit. Wird das Rad gleichmäßig gedreht, so wird der Stab *a* von der Scheibe *e* in einer Richtung hin- und herbewegt, während er durch die Scheibe *f* in eine relativ beliebig rasche schwingende Bewegung rechtwinklig zur ersten versetzt wird. Auf diese Weise zeigt das obere Ende des Stabes *a*, welches auch einen kleinen Kugelpiegel tragen kann, alle die schönen akustischen Figuren der kombinierten rechtwinklig zueinander verlaufenden Schwingungen.

Frage 1008. Da der Apparat von Lissajous kostspielig ist, einer größeren Anzahl sehr genau abgestimmter Gabeln mit elektromagnetischem Antriebe bedarf und ein beabsichtigter Phasenunterschied schwierig zu bewerkstelligen ist, so hat man verschiedene Vorrichtungen ersonnen, um die Lissajous'schen Figuren auf anderem Wege zu erzeugen. Durch welches Mittel gelangt man am einfachsten zu einer mechanischen Hervorbringung der besprochenen Figuren?

Fig. 555.



Erkl. 933. Beträgt die Länge des ganzen Pendels von der Mitte des obe-

Antwort. Am einfachsten gelangt man mittelst geeigneter Pendelvorrichtungen zu den besprochenen Lichtkurven. Für den Fall gleicher Schwingungsdauer beider Schwingungsbewegungen genügt ein einfaches Fadenpendel. Lassen wir dasselbe z. B. genau von Osten nach Westen schwingen, und versetzen ihm, sobald es in den beiden äußersten Punkten *c* oder *d* seiner Bahn angekommen ist, einen Stoß in nordsüdlicher Richtung, so schwingt die Pendelkugel in Ellipsen, deren mehr oder weniger gestreckte Form (oder Exzentrizität) von der Intensität der stoßenden Kraft abhängig ist, und welche unter Umständen in einen Kreis oder in eine gerade Linie übergehen können. Soll aber die Schwingungsdauer der beiden rechtwinklig zu einander gerichteten Komponenten eine verschiedene sein, so benutzt man am besten ein sogenanntes Doppelpendel von der Form der Figur 556, bei welchem die Figuren durch den aus dem Trichter ausfließenden Sand aufgezeichnet werden. Durch Verschieben des die Schnüre zusam-

ren Balkens bis zur Mitte des den Trichter tragenden Bleiringes z. B. 1000 mm, so muß die Länge des unteren Pendels, vom Ringe *r* bis zur Mitte des Bleiringes in mm den folgenden Zahlen entsprechen, um die nebenstehenden Schwingungsverhältnisse zu erhalten:

250 mm,	1 : 2,	Oktave
444,4 „	2 : 3,	Quinte
562,5 „	3 : 4,	Quarte
640 „	5 : 4,	gr. Terz
694,4 „	5 : 6,	kl. Terz
734,6 „	6 : 7,	vermind. Terz
766,6 „	7 : 8,	vermehrte Sek.
790,1 „	8 : 9	Sekunde.

Viel vollkommenere vibrographische Darstellungen von Schwingungskurven, als sie mit dem vorstehend beschriebenen Doppelpendel möglich sind, erhält man mit Hilfe der von Eisenlohr, Mos, Knoblauch, Tisley und Schönemann konstruierten Pendelapparate, von denen nur die von den beiden letztgenannten Physikern konstruierten Vibrographen hier eine kurze Darstellung erfahren mögen.

menfassenden Röhrchens *r*, sowie durch entsprechendes Drehen der Schraube *s* lassen sich die verschiedenen Intervalle herstellen, wobei man sich zu erinnern hat, dass nach den Gesetzen der Pendelschwingungen (siehe Lehrbuch der Dynamik) ein 1 m langes Pendel mit der doppelten Geschwindigkeit eines 4 m langen Pendels schwingt.

Bei Beginn des Versuchs wird das Pendel stets an einem unter 45° gegen die Verbindungslinie der Säulen an einem Haken angebundenen Faden festgehalten, welcher, sobald der Apparat in voller Ruhe ist, durchgebrannt wird.

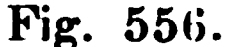
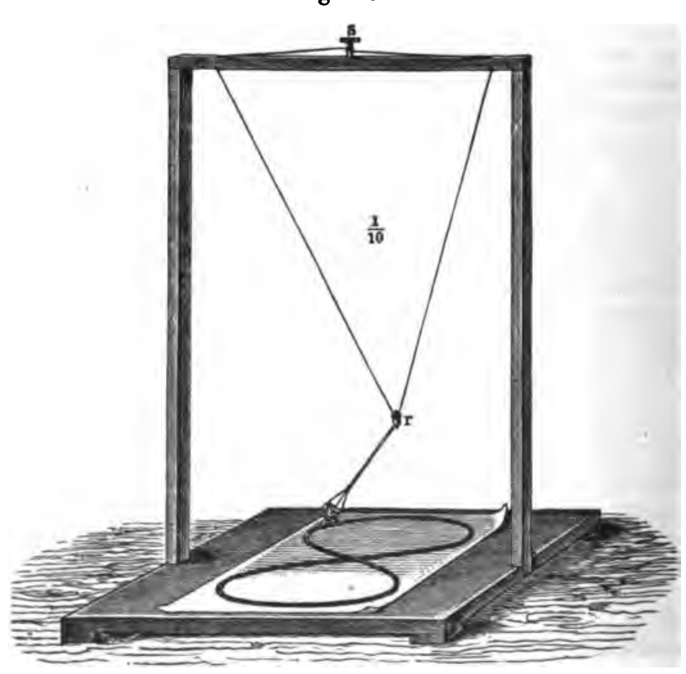
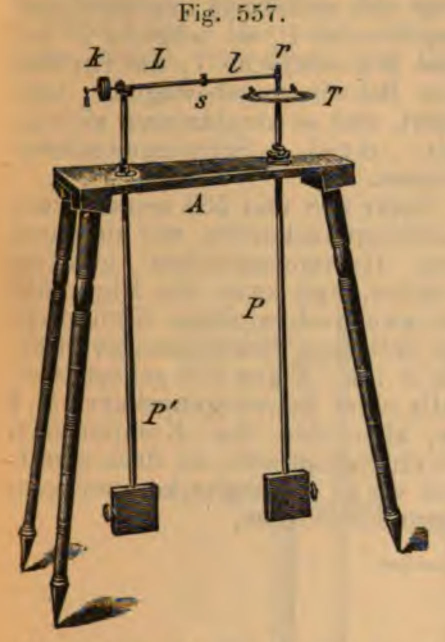


Fig. 556.



Frage 1009. Welche Einrichtung zeigt der von Tisley konstruierte „H a r m o n o g r a p h''?

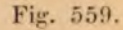
Fig. 557.

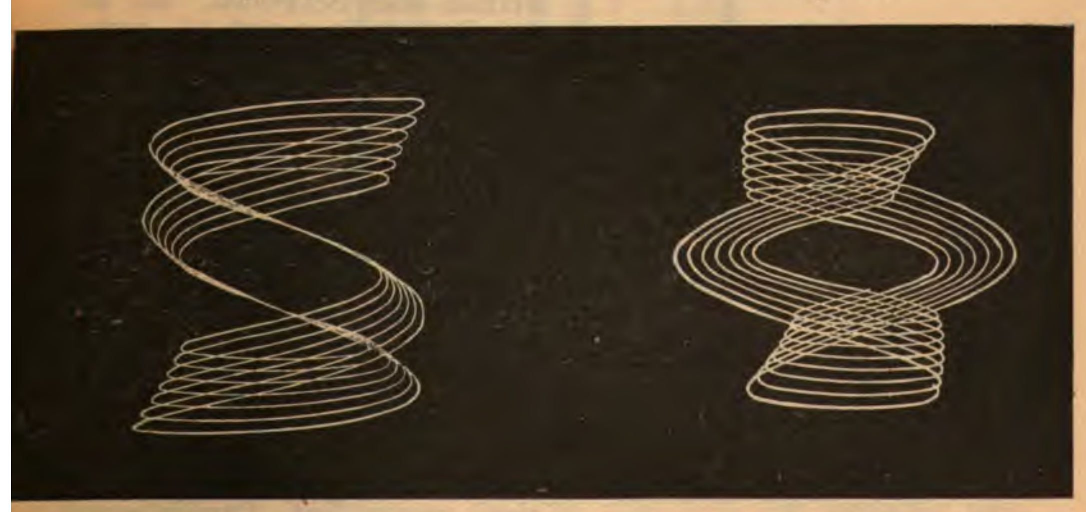


Erkl. 933a. Die mechanischen Werkstätten von E. Leybold's Nachfolger in Köln a. Rh., liefern diesen Apparat, der vorstehenden Figur entsprechend, zu Mk. 120.

Antwort. Von Tisleys „H a r m o n o g r a p h'' gibt die Figur 557 eine Darstellung. Die beiden Pendel P und P' ruhen auf der Holzplatte A in Cardanischer Aufhängung (siehe *Fig.* 554); P trägt oben eine kleine Tischplatte T, auf welcher der vom anderen Pendel P' bewegte Schreibstift r seine Aufzeichnungen macht. Das Pendel P' endet nämlich oben in einem kurzschenkeligen Gabelstücke mit einem Stabe L, an dem wiederum durch die Schraube s eine feinere Lamelle l befestigt werden kann. Diese Lamelle trägt den Schreibstift r. Ein Gegengewicht k hält die Stangen L und l nebst Stift r im Gleichgewicht. Mittelst dieses Apparates können d r e i Schwingungszahlen vereinigt werden, nämlich die des Pendels P, die des Pendels P', und die der Lamelle l. Das Pendel P', nebst der Lamelle l, welche eine horizontale Vibrationsbewegung ausführt, bildet schon ein Doppelpendel, das bei ruhendem Pendel P schon imstande ist, auf der in Ruhe befindlichen Tischplatte T eine Schwingungskurve als Resul-

Fig. 558. Fig. 559.





tat zweier geradlinigen Komponenten, nämlich der Bewegung von P) und der von *l* zu liefern. Bewegt sich außerdem nun auch noch das Pendel *P*, so schreibt *l* auf eine Schreibfläche *T*, die für sich eine Schwingungsbewegung vollführt, und es kombinieren sich somit drei Schwingungsbewegungen.

Figur 558 und 559 zeigen zwei Schwingungskurven, wie sie durch den Harmonographen geliefert wurden, und zwar die Figur 558 für zwei rechtwinklige Komponenten mit dem Schwingungsverhältnis 3 : 1. Figur 559 gehört ebenfalls einer Schwingungskurve 3 : 1 an, aber eine der Komponenten ist eine elliptische, so dass eigentlich drei Elementarkomponenten zusammenwirken.

Frage 1010. Welche Einrichtung zeigt das exakt arbeitende „Kreuzpendel" von P. Schönemann?

Erkl. 934. Ueber die Entstehung solcher Kurvenzeichnungen ist folgendes zu bemerken: Wenn die schwingenden Pendel ihre anfänglichen Schwingungsweiten beibehielten, so müßte eine Zeichnung entstehen, bei welcher die einzelnen hintereinander sich wiederholenden Schwingungskurven sich deckten, da aber die Elongationsweiten, infolge der Bewegungswiderstände immer kleiner werden, so müssen auch die Kurvenzüge sich immer mehr zusammenziehen, wie aus den Zeichnungen deutlich zu ersehen ist.

Antwort. Fig. 560 stellt den Apparat dar. Die beiden Pendel *P* und *P'* drehen sich um zwei Spitzen oder Schneiden, die an den Querarmen *a* und *a'* angebracht sind und auf je einem untergelegten Metallplättchen aufsitzen. Das Pendel *P* trägt unten einen Querarm *s*, der an den Enden auch in zwei Spitzen ausläuft, welche ihrerseits bei *t* in passende Vertiefungen der Seitenarme des Rahmens *t t* eingreifen, so dass dieser Rahmen, wenn das Pendel P in Schwingung versetzt wird, auch eine Pendelbewegung ausführt. Dies wird aber weiter möglich dadurch, dass der *s* gegenüberliegende Arm des Rahmens t t in seiner Mitte *m* an zwei Fäden f f, aufgehängt ist, wodurch erst eine regelmäßige Parallelbewegung des ganzen Rahmens erzielt wird. Das Pendel *P'* ist nicht wie *P* unmittelbar auf der oberen Platte des ganzen Pendelgestelles

aufgehängt, sondern zunächst auf eine Platte *p* aufgesetzt, welche sich um eine Achse drehen und durch die Schraube *c* in verschiedenen Lagen feststellen läßt. Hierdurch wird bewirkt, daß die Schwingungsrichtung des Pendels *P'* gegenüber der von *P* auch unter einem schiefen Winkel eintreten kann. Das untere Ende von *P'* trägt wiederum einen beweglichen Arm *L*, der durch das Gegengewicht *k* so ausgeglichen werden

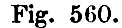
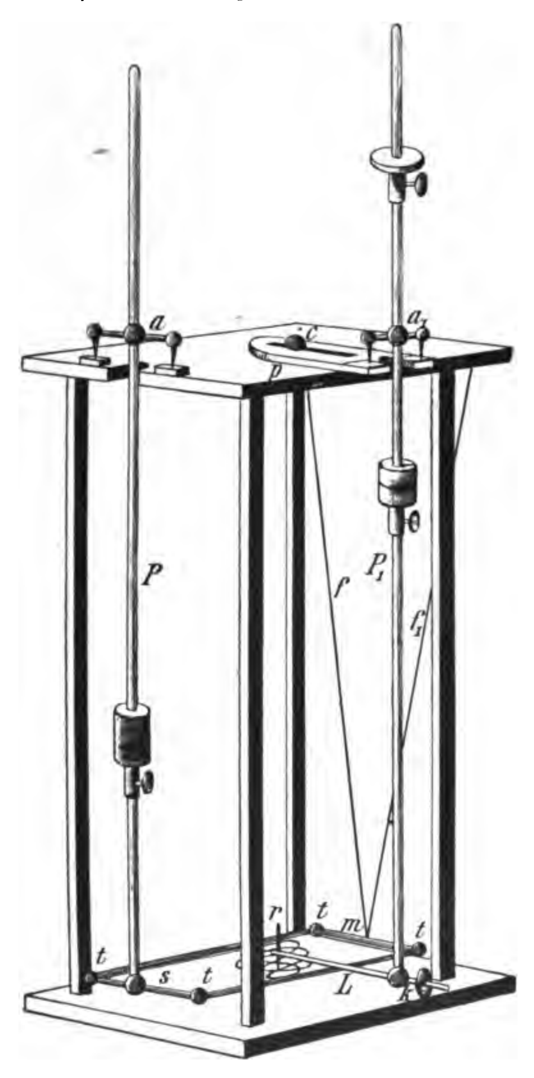


Fig. 560.

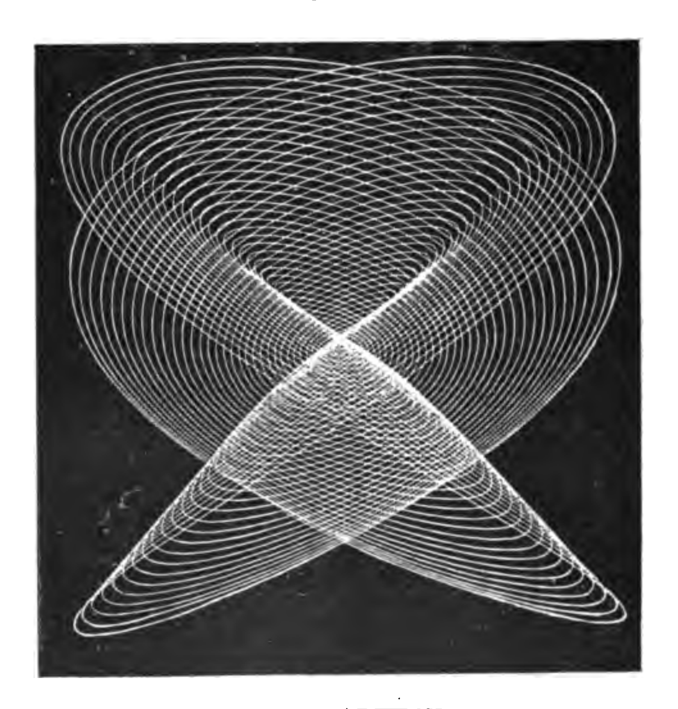


kann, daß der Schreibstift *r* nur ganz leise über eine Glasplatte oder einen Karton, den man sich auf den Rahmen *tt* aufgelegt denken muß, hingleitet, um so auf diesem eine Schwingungskurve aufzuschreiben.

Dieser Apparat liefert vollkommen geradlinige Schwingungskomponenten, indem keines der beiden Pendel das andere beeinflußt.

Die mit Hilfe dieses Apparates erhaltenen Kurven haben eine bedeutende Größe und sind sehr scharf. Figur 561 zeigt einen solchen Kurvenzug fast in $^2/_3$ natürlicher Größe, wie er auf einer berußten Glasplatte markiert und nachher photographisch vervielfältigt wurde. Man erkennt eine Kurve für das Schwingungsverhältnis 3 : 2. (Melde).

Fig. 561.



Frage 1011. Schließlich soll hier noch das für den Schulgebrauch besonders geeignete Vibratorium von Bergmann (Greifswalde 1888) Erwähnung finden. Wodurch unterscheidet sich dasselbe ganz wesentlich von den oben beschriebenen Pendelapparaten und welche Einrichtung zeigt dasselbe?

Erkl. 935. Die Steuerungsräder haben gleiche Radien, und die Zapfen t sind von den Drehungsachsen gleich weit entfernt. Die Rollen der Vorrichtung v kann man durch andere, dem Apparate beigegebene ersetzen und auf diese Weise das Verhältnis ihrer Radien verändern. Das Zapfenlager für

Antwort. Der von Bergmann konstruierte Apparat zur mechanisch-graphischen Darstellung der Schwingungskurven enthält zur Erzeugung einfacher Schwingungen anstelle der Pendel sogenannte Sinussteuerungen. Derselbe ist in Figur 562 in $^1/_{10}$ natürlicher Größe abgebildet. Auf der Vorderseite eines durch drei quadratische Türen geschlossenen Gehäuses befindet sich unten rechts in dem nicht verdeckten Raume die Schreibvorrichtung. Zwei zueinander senkrechte Schienen x und y sind ihrer ganzen Länge nach durchbrochen. Die Kreuzungsstelle der Durchbrechungen dient

die Rollen von v ist im Einschnitte e verstellbar, so dass man durch entsprechendes Spannen der Uebertragungsschnüre sowohl beide Steuerräder zugleich, aber auch jedes allein von v aus bewegen kann.

Schließt man die drei Türen und schraubt auf die Zapfen t und Bügel b die 4 Metallknöpfe auf, so entsteht die in Fig. 562 dargestellte Form. Das Vibratorium zeigt die Abhängigkeit der Schwingungskurven

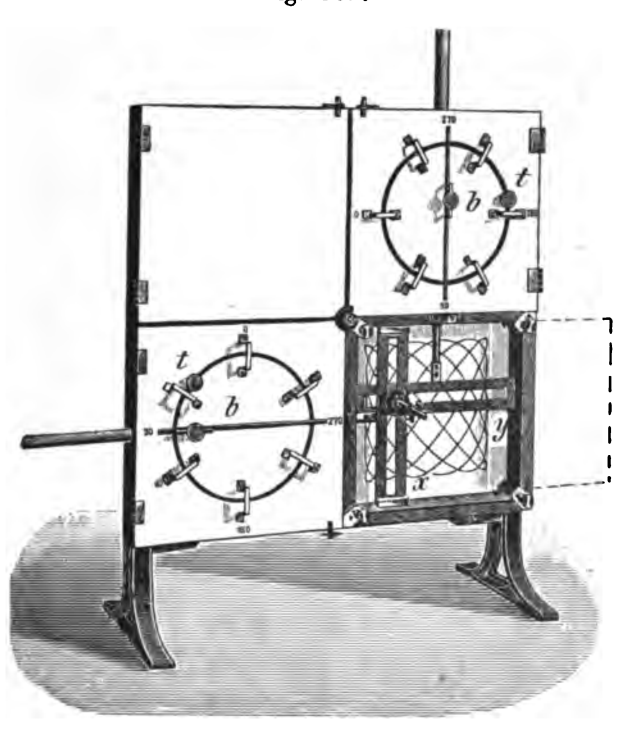
a) von dem Verhältnis der Schwingungszahlen,

b) von der Phasendifferenz der Schwingungen. Soll z. B. die der Quinte entsprechende Kurve (2 : 3) dargestellt werden, so setzt man bei v Rollen auf, deren Radien in dem Verhältnis von 2 : 3 stehen, alsdann macht von den Schienen x und y die eine 2 volle Schwingungen, während die andere deren 3 ausführt. Vermittelst zweier an den freien Enden ihrer Achsen auf

zur Aufnahme eines Halters für den Schreibstift. Seitlich rechts ist durch einen Einschnitt in den Rahmen des Gehäuses ein Blatt Schreibpapier eingeschoben (durch die gestrichelte Linie angedeutet), auf welches der Stift die Kurven zeichnet, sobald der in dem Gehäuse eingeschlossene Mechanismus vermittelst einer außerhalb auf der Rückseite befindlichen Kurbel in Bewegung gesetzt wird. Die Schiene x führt dann in horizontaler, die Schiene y in vertikaler Richtung einfache Schwingungen aus. Die Kreuzungsstelle der Durchbrechungen beider Schienen, und folglich auch der darin sitzende Schreibstift, bewegen sich dabei in der resultierenden Schwingungskurve.

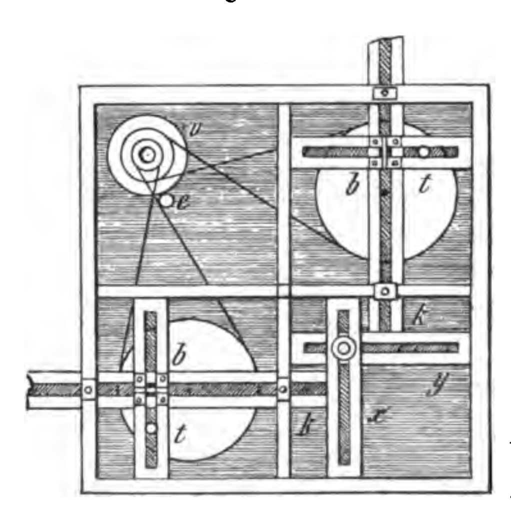
Wie die Bewegungen von x und y zustande kommen, das können wir an Fig. 563 ersehen, welche

Fig. 562.



der Rückseite des Vibratoriums angebrachten Griffe lassen sich die Steuerungsräder so einstellen, dass sie einer gegebenen Phasendifferenz entsprechen, welche man an den Stellungen der Metallknöpfe auf den Kreisperipherien erkennt, zu welchem Zwecke bei den Kreisquadranten die Zahlen 0,90 etc. angeschrieben sind. (Die mechanischen Werkstätten von Ferdinand Ernecke, Berlin SW. liefern diesen Apparat zu Mk 165.)

Fig. 563.



den inneren Mechanismus darstellt. Oben rechts und unten links sehen wir je eine Sinussteuerung, deren Wirkungsweise wir am besten vergleichen können mit der Bewegung eines Dampfkolbens und seiner Kurbelwarze (siehe I. Bd. der Akustik, Seite 18). Die Bügel b und die Zapfen t (siehe in beiden Figuren) ragen, wenn die Türen geschlossen sind, durch die in dieselben eingeschnittenen Bahnen hindurch, um als Träger für 4 Metallknöpfe zu dienen, welche die Schwingungsbewegungen auf den Kreisdurchmessern und die zugehörigen Kreisbewegungen auf den Peripherien markieren. Die Schienen x und y sind in einfacher Weise bei k an den Steuerungen befestigt.

Das Drehen der Räder geschieht durch die Vorrichtung bei v. Eine die Wand des Gehäuses durchbrechende Achse trägt an der Außenseite die bereits erwähnte Kurbel. Auf dem inneren in Fig. 563 sichtbaren Ende sitzen zwei Rollen. Von jeder derselben läuft eine gekreuzte Schnur ohne Ende nach den Rädern hin, welche die Steuerungen mit Hilfe zweier Kurbelschleifen und der Zapfen t bewegen.

---

c) Die Klangfarbe.

α) Haupteigenschaften des Klanges.

Frage 1012. Was verstehen wir unter der Klangfarbe?

Erkl. 936. Wenn ein und derselbe Ton, z B. der Kammerton a' mit 435 Schwingungen (wie z. B. beim Stimmen der Orchesterinstrumente) in gleicher Stärke von verschiedenen Instrumenten angegeben wird, so können wir sofort hören, auch ohne die Instrumente zu

Antwort. Unter Klangfarbe verstehen wir die Eigentümlichkeit, durch welche die Töne oder Klänge verschiedener Instrumente und verschiedener Stimmen, wenn sie auch gleiche Höhe und gleiche Stärke besitzen, sich voneinander unterscheiden.

Während die Tonhöhe durch die Schwingungszahl und die Ton-

sehen, ob der betreffende Ton von einem Streich- oder einem Blasinstrumente, von einem Holz- oder Blechinstrumente herrührt. In Bezug auf die Abänderung der Klangfarbe sind besonders die Streichinstrumente ausgezeichnet, aus deren Klange ein erfahrener Musiker sofort erkennt, ob der Ton von einem guten oder weniger guten Instrumente herrührt, ob er offen oder gedämpft, ob er ein gewöhnlicher oder ein Flageolett-ton ist.

stärke durch die Schwingungsweite bedingt ist, ist die Klangfarbe von der Schwingungsform oder Wellenform abhängig. Aus dem Inhalte des vorigen Kapitels haben wir erfahren, dass einfache pendelartige Schwingungen immer dieselbe einfache regelmäßige Wellenform geben, sowie dass diese Form nur verändert wird, wenn die Schwingungsbewegung eine zusammengesetzte ist.

Frage 1013. Wodurch unterscheidet sich ein Ton von einem Klange?

Erkl. 937. Bei der menschlichen Stimme, dem reichhaltigsten musikalischen Instrumente, ist die Verschiedenartigkeit der Klangfarbe eine so vielseitige, dass es kaum zwei Menschen gibt, welche genau dieselbe Klangfarbe der Stimme haben, und die tägliche Erfahrung lehrt, dass wir den Klang einer bekannten Stimme aus Hunderten zu erkennen vermögen.

Antwort. Unter einem Tone verstehen wir immer eine einfache Gehörsempfindung, welche einer weiteren Zerlegung nicht fähig ist, weil die den Ton erregende Schwingungsweise eine einfache oder harmonische ist, während wir unter Klang jeden aus mehreren einfachen Teiltönen zusammengesetzten Schall verstehen.

Frage 1014. Worin hat die Verschiedenartigkeit der Klangfarbe ihren physikalischen Grund?

Erkl. 938. Bei der Betrachtung der transversalen Schwingungen der Saiten (II. Band der Akustik, Seite 18) haben wir in Erfahrung gebracht, dass mit dem Grundtone einer Saite, zumal wenn dieselbe dünn und lang ist, stets eine ganze Reihe von Partialtönen auftreten, sowie dass wir je nach der Wahl der Anschlage- oder Anstrichstelle den Grundton oder einen seiner Obertöne vernichten können und dass in jedem solchen Falle der Ton einen anderen Klang erhält. Der Unterschied des Klanges wird durch die jeweilig mit einem Tone zugleich auftretenden Teiltöne bewirkt.

Antwort. Die Verschiedenheit der Klangfarbe hat ihren Grund in der verschiedenartigen Zusammensetzung der Ton- (od. Klang-) wellen; in dem Vorhandensein von Obertönen neben dem Grundtone, wobei die Obertöne sehr verschieden stark auftreten und demnach die Klangfarbe verändern können.

Frage 1015. Was verstehen wir unter der H ö h e eines Klanges?

Antwort. Unter der H ö h e eines Klanges verstehen wir die Höhe seines Grundtones. Doch können starke Obertöne zu Täuschungen führen, so dass uns der Ton höher erscheint, als er wirklich ist. Deshalb irren sich selbst geübte Musiker zuweilen in der Oktave, wenn sie sehr verschiedene Klangfarben vergleichen.

Frage 1016. Warum nehmen wir die Obertöne für gewöhnlich n i c h t wahr?

Erkl. 939. Welche Obertöne sich dem Grundtone beimischen und in welcher S t ä r k e jeder derselben auftritt, das hängt sowohl von der Natur des klingenden Körpers, sowie von der Art der Tonerregung ab. Je nachdem man eine Saite reißt, zupft, streicht oder anschlägt, wird die Tonmischung ihres Klanges eine andere, und auch die verschiedene Elastizität des Materials ändert das Verhältnis der Obertöne, so dass eine Darmsaite anders klingt als eine Metallsaite.

Antwort. Weil wir ein solches Hören der Obertöne nicht geübt haben, indem dasselbe zum Anhören und Genuß eines Musikstückes nicht notwendig ist. Dazu kommt, dass alle Teiltöne zugleich mit dem Beginne des Klanges einsetzen, mit ihm stärker und schwächer werden, und alle zugleich mit ihm aufhören. Ueberdies treten die Obertöne vor dem Grundtone, seinen Oktaven und deren Kombinationstönen zurück und werden mit wachsender Ordnungszahl immer schwächer.

Frage 1017. Wie lautet das hierauf bezügliche, von G. S. Ohm aufgestellte Gesetz?

Erkl. 940. Seebeck nahm Ohm gegenüber an, dass in einer zusammengesetzten periodischen Schwingung die einzelnen Töne nicht zu unterscheiden wären, dass aber in der durch das Hinzutreten der weiteren Schwingungen bedingten Veränderung des Schwingungsgesetzes eine Ursache der Klangverschiedenheit gleich hoher Töne zu suchen sei. Erst Helmholtz lieferte den Nachweis, dass in einem Klange alle die Töne, wie sie das Gesetz von Ohm verlangt, wirklich vorhanden und dem Ohre wahrnehmbar sind.

Antwort. D a s m e n s c h l i c h e O h r e m p f i n d e t n u r e i n e p e n d e l a r t i g e S c h w i n g u n g d e r L u f t a l s e i n e n e i n f a c h e n T o n u n d z e r l e g t j e d e a n d e r e, a u s z u s a m m e n g e s e t z t e n W e l l e n b e s t e h e n d e L u f t b e w e g u n g i n e i n e R e i h e v o n p e n d e l a r t i g e n S c h w i n g u n g e n, d e n e n e b e n s o v i e l e e i n f a c h e T ö n e e n t s p r e c h e n. Somit ist die Empfindung eines Klanges aus der Empfindung mehrerer Töne, nämlich des Grundtones mit seinen Nebentönen zusammengesetzt.

Frage 1018. Wenn wir eine größere Zahl einfacher pendelartiger Luftschwingungen, welche sich in ihrer Amplitude und Schwingungsdauer unterscheiden, zusammensetzen wollten, so würden sich die mannigfachsten Schwingungsformen ergeben. Welches Gesetz hat mit Bezug hierauf der berühmte franz. Mathematiker Fourier aufgestellt und streng mathematisch bewiesen?

Erkl. 941. Wenn mehrere tönende Körper in dem uns umgebenden Luftraume gleichzeitig Schallwellen erregen, so sind sowohl die Veränderungen in der Dichtigkeit der Luft, als auch die Verschiebungen und Geschwindigkeiten der Luftteilchen im Innern des Gehörganges gleich der Summe derjenigen entsprechenden Veränderungen, Verschiebungen und Geschwindigkeiten, welche die einzelnen Schallwellen einzeln genommen hervorgebracht haben würden.

Wenn zwei Stimmgabeln in dem Schwingungsverhältnis 1 : 2 od. 1 : 3 zusammenklingen, so ist erfahrungsgemäß das Ohr wohl imstande, ihre Töne von einander zu unterscheiden, ebenso vermag es einen einzelnen Klang in eine Reihe von Partialtönen zu trennen und vermöge dessen verschiedene Klänge voneinander zu unterscheiden.

Antwort. Jede beliebige, regelmäßig periodische Schwingungsweise und Schwingungsform läßt sich betrachten als die Summe vieler einfachen pendelartigen Schwingungen. Da nun eine regelmäßig periodische Bewegung einem musikalischen Klange entspricht, und eine einfache pendelartige Schwingung einem einfachen Tone, so läßt sich der Satz von Fourier auch so aussprechen:

J e d e S c h w i n g u n g s b e w e g u n g d e r L u f t i m G e h ö r g a n g e , w e l c h e e i n e m m u s i k a l i s c h e n K l a n g e e n t s p r i c h t , k a n n i m m e r u n d j e d e s m a l n u r i n e i n e r e i n z i g e n W e i s e d a r g e s t e l l t w e r d e n a l s d i e S u m m e e i n e r A n z a h l e i n f a c h e r s c h w i n g e n d e r B e w e g u n g e n , w e l c h e T e i l t ö n e n d i e s e s K l a n g e s e n t s p r e c h e n.

Frage 1019. Wir haben schon mehrfach (besonders bei der Betrachtung der Tonerreger im II. Bande der Akustik) erwähnt, dass sich mit unseren gebräuchlichen Tonquellen nur Töne erzeugen lassen, welche stets von einer Anzahl von Obertönen begleitet sind. Auf welche Weise können wir aber e i n f a c h e T ö n e oder Klänge ohne Obertöne erzeugen?

Erkl. 942. Wie durch eine Reihe von eingehenden Untersuchungen erwiesen ist, wird die Klangfarbe eines Tones

Antwort. Dies kann geschehen, indem man eine angeschlagene Stimmgabel über eine auf denselben Ton abgestimmte Resonanzflasche hält; die Obertöne einer Stimmgabel sind unharmonisch zu dem Grundtone, stimmen daher nicht mit den Obertönen der Flasche überein (die ohnedies schwer ansprechen) und können dieselben also auch nicht zum Mittönen bringen. Demnach wird nur der Grundton der Flasche durch die Stimmgabel erregt. Reine ein-

durch die Gesamtheit seiner Teiltöne bestimmt. Ist der Ton reich an höheren Obertönen von großer Intensität, so wird die Klangfarbe im allgemeinen scharf, wie dies z. B bei einigen Zungenpfeifen deutlich hervortritt, Ein Mangel an geradzahligen Obertönen verleiht der Klangfarbe den eigentümlichen Charakter des Tones der engen gedeckten Orgelpfeifen. Zuweilen kann man die den Obertönen entsprechenden Wellenlinien an den Tonschriften beobachten (siehe Phonautograph I. Bd. Seite 102).

Die Partialtöne der menschlichen Stimme, obschon am schwierigsten zu unterscheiden, hat schon Rameau (1726) und später Garcia in einem gesungenen Klange wahrgenommen, und auch Sulzer (gest. 1779) kannte die Tatsache, dass der Grundton einer Saite in der Regel von höheren Tönen begleitet wird. Thomas Young hat bereits im Jahre 1800 gezeigt, dass, wenn man eine Saite zupft oder schlägt in einem Punkte, welcher Knotenpunkt eines ihrer Flageoletttöne ist, diejenigen einfachen Schwingungsformen, welche in dem angegriffenen Punkte einen Knoten haben, in der Gesamtbewegung der Saite nicht enthalten sind. Helmholtz löste die Aufgabe, für die Erklärung der Klangfarbe eine sichere Grundlage zu schaffen; die Art und Weise seiner Untersuchungen werden wir noch näher kennen lernen.

fache Töne lassen sich aber auch erzielen, wenn wir eine Stimmgabel mit dem Violinbogen anstreichen, oder wenn aus einem Klange durch einen Resonator (s. Seite 98) irgend ein Oberton abgeschieden wird.

Rayleigh hat (1879) gefunden, dass die Töne singender Wasserstoffflammen ganz rein von Ober- und Nebentönen werden, wenn man sie in einem weitbauchigen Lampenzylinder erzeugt. Auch die vom Radiophon (s. II. Bd. S. 405) sowie von ausfließenden Wasserstrahlen erzeugten Töne gehören zu den einfachen.

Schwach angeblasene, weit mensurierte gedeckte Pfeifen, bauchige Flaschen, Brummkreisel, Resonatoren und Sirenen geben ebenfalls einfache Töne. Auch die Flageoletttöne gestrichener Saiten, nahezu die Kopftöne weicher Sopranstimmen, sowie leise angeblasener Flöten zählen zu den einfachen Tönen.

Unter den menschlichen Stimmlauten kommt das *U* diesen einfachen Tönen am nächsten, obgleich auch dieser Vokal nicht ganz frei von Obertönen ist.

Alle diese Töne sind ungemein weich, und machen den Eindruck einer ungewöhnlichen Tiefe; sie sind in den höheren Lagen hell, in den tieferen dumpf aber stets frei von Schärfe und Rauhigkeit.

Frage 1020. In welchen verschiedenen Beziehungen können die in einem Klange enthaltenen Obertöne zum Grundtone stehen?

Antwort. Die in einem Klange enthaltenen Obertöne können zum Grundtone harmonisch und auch unharmonisch sein, sie können den tieferen oder höheren Reihen angehören, auch können einzelne Partialtöne vor anderen hervortreten.

Alle flächen- und stabförmigen Körper geben Klänge mit unhar-

Erkl 943. Wird eine Stimmgabel angeschlagen, so hört man wegen des starken Klanges ihrer hohen und unharmonischen Obertöne kaum den Grundton, da die ersteren aber rasch verklingen,

so wird der Grundton sehr bald fast allein hörbar. Die Schwingungszahlen dieser Obertöne verhalten sich zueinander wie die Quadrate der ungeraden Zahlen (9 : 25 : 49 etc.).

Auch in Stäben von Glas und Holz verklingen die Obertöne sehr rasch, aber mit ihnen auch der Grundton, weil die Elastizität und Masse solcher Stäbe gering ist, daher geben dieselben einen kürzeren Ton wie Metallstäbe, welche wegen ihrer größeren Masse und Elastizität länger in Bewegung bleiben. Der metallische Klang beruht in dem ausdauernden Vorwalten hoher Obertöne.

monischen Obertönen, wenn sie durch S c h l a g erregt werden, wie z. B. Scheiben (in Glasharmonika und Metallophon), Glokken, gespannte Membranen, Stäbe usw. Streng genommen sind ihre Klänge nicht musikalisch.

Die eigentlichen m u s i k a l i s c h e n Organe, zu denen nebst der menschlichen Stimme alle Saiten- und Blasinstrumente, sowie die Orgelpfeifen und Zungeninstrumente gerechnet werden, geben Klänge mit h a r m o n i s c h e n Obertönen.

Frage 1021. Warum finden derartige Tonquellen trotzdem (wenn auch nur in beschränktem Maße) Anwendung?

Erkl. 944. Bei Glocken kann man die Töne harmonisch zueinander machen, wenn dieselben nach dem Rande zu dünner werden; das Glockengeläute, das Glockenspiel und die Glasharmonika sind daher schon erträglicher, obwohl längere Stücke derselben die Nerven angreifen. Ist eine Glocke inbezug auf ihre Achse nicht ganz symmetrisch, z. B. die Wand an einer Stelle etwas dicker, so gibt die Glocke zwei ein wenig voneinander verschiedene Töne, die miteinander Schwebungen geben. Werden die gespannten Membranen mit einem Luftraume verbunden, wie bei der Pauke, so wird das Verhältnis der Töne abgeändert und der Grundton in seiner Stärke begünstigt.

Antwort. Weil bei mäßiger Verwendung solcher Tonquellen ihre sehr hohen Obertöne weniger auffallen und manchen Musikstücken in der Militär- und Tanzmusik etwas helles und heiteres geben, worauf die Anwendung des Triangels, des Metallophons und Schellenbaums beruht. Eine ausschließliche, längere Zeit dauernde Stahlmusik wird jedoch bald unerträglich, gleichwie die Klänge der Glocken, Scheiben und Membranen, weil deren unharmonische Nebentöne dem Grundtone sehr nahe liegen.

Frage 1022. Mit Hilfe welches Apparates und auf welche Weise können wir den Unterschied zwischen Klängen mit harmonischen und unharmonischen Obertönen besonders deutlich machen?

Erkl. 945. Auch die Aeolsharfe, deren angenehme Klangfarbe hinlänglich bekannt ist, kann als ein Obertöne-

Antwort. Mit Hilfe von Appunn's „O b e r t ö n e a p p a r a t e", bei welchem die tongebenden Körper Harmonikazungen sind. Läßt man bei diesem Apparate die ersten 16 harmonischen Obertöne zugleich ertönen, so hört man nur angenehme Töne des

apparat angesehen werden. Bei Appuns Apparat gibt der tiefste Ton 32 Schwingungen (Kontra-*C*) und an ihn reihen sich weitere 64 Obertöne. Weinhold hat einen einfacheren Obertöneapparat konstruiert, bestehend aus einer Windlade mit 10 Zungenpfeifen und selbsttätiger Windregulierung, das *C* von 64 Schwingungen und die Obertöne desselben bis *e*" von 650 Schwingungen gebend. Dazu sind neun kegelförmige gedeckte Resonatoren von Zinkblech käuflich.

Erkl. 946. Die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Schwingungsdauer haben wir bereits im ersten Bande der Akustik (Seite 117 u. f.) erörtert; die Faktoren, durch welche die Tonstärke bedingt wird, lernten wir im vorliegenden Bande (Seite 56 u. f.) kennen und in den folgenden Zeilen wollen wir die verschiedenen Klangzerlegungsmethoden beschreiben, durch welche sich der Nachweis liefern läßt, dass die Klangfarbe von der Anzahl, der Höhe und Stärke der den Grundton begleitenden Partialtöne abhängig ist, abgesehen von den charakteristischen Geräuschen bei der Tonerregung und dem Einflusse, welchen das Material des tönenden Körpers auf seine Schwingungsform ausübt.

Dreiklangs c-e-g. Wenn man dagegen 16 Untertasten des Klaviers auf einmal mittelst einer Leiste niederdrückt (oder 8 aufeinander folgende Tasten), so empfindet das Ohr ein vollständiges unangenehmes Geräusch. Hieraus ergeben sich die folgenden zwei wichtigen Sätze:

1) Wenn eine Tonmenge zu unserem Ohre gelangt, deren Teiltöne im Schwingungsverhältnis 1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 8 stehen, so übt eine solche Klangmasse (bei welcher auch einzelne Töne fehlen können) auf unser Ohr einen angenehmen Eindruck aus.

2) Wenn dagegen eine Klangmasse zum Ohre gelangt, bei welcher die Schwingungszahlen ihrer Teiltöne nicht das Gesetz der natürlichen Zahlen befolgen, so empfindet das Ohr einen Mißklang.

β) Zerlegung eines Klanges in seine Partialtöne. (Klanganalyse).

Frage 1023. Wir bemerkten bereits, dass die in einem Klange enthaltenen Obertöne nur musikalisch geübten Ohren wahrnehmbar sind; welcher Mittel können wir uns bedienen, um auch e i n e m u n m u s i k a l i s c h e n B e o b a c h t e r die in einem Klange enthaltenen Obertöne klar und deutlich sinnlich wahrnehmbar zu machen?

Antwort. Wir können die Obertöne eines Klanges dadurch zur sinnlichen Wahrnehmung bringen, dass wir durch dieselben geeignete Membranen, Resonatoren oder gespannte Saiten zum Mittönen bringen, oder indem wir mit Hilfe der König'schen Gaskapseln charakteristische Flammenbilder erzeugen. Diese verschiedenen Methoden sollen in den folgenden Zeilen eine nähere Besprechung erfahren.

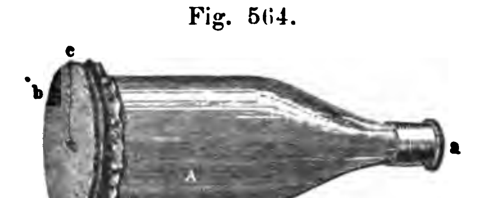
Frage 1024. In welcher Weise können Membranen als klanganalysierende Mittel dienen?

Erkl. 947. Der Sand auf einer über einen horizontalen Rahmen gespannten Membran gerät in Bewegung, so oft man durch Singen aus der Entfernung ihre Eigentöne erregt. Am leichtesten geschieht dies, wenn man die Membrane mit einem bestimmten, abgegrenzten Luftvolumen verbindet, wie F. 564 zeigt. Man wendet dann die Membran nach oben und bestreut sie mit Sand. Der Grundton eines solchen Resonators wird um so tiefer, je größer die Membran oder das Luftvolumen genommen werden, je weniger man erstere spannt und je enger die Oeffnung des resonatorförmigen Körpers ist. Da die Membranen am leichtesten auf ihren Oberton ansprechen, so sind bei Untersuchungen mehrere derselben von verschiedener Größe notwendig. Zu demselben Zwecke dient auch das Helmholtz'sche Membranpendel (siehe Seite 97), dessen Handhabung sehr bequem ist, da man nicht erst Sand aufzustreuen braucht, sondern der Apparat immer zum Gebrauche fertig ist.

Eine solche Membran gerät nicht blos durch Klänge, deren Tonhöhe ihrem eignen Tone gleich ist, in Schwingungen, sondern auch durch solche, in welchen der Eigenton der Membran als Oberton enthalten ist. Sie haben den großen Vorzug, dass bei ihrer Anwendung das Ohr gar nicht in Betracht kommt, aber sie sind gegen schwächere Töne nicht empfindlich genug, und werden hierin bei weitem übertroffen durch die von Helmholtz angegebenen Resonatoren.

Antwort. Wir können zu diesem Zwecke einen größeren Holz- oder Metallrahmen, über den eine Papiermembran gespannt ist, in die Nähe unseres Ohres halten; achten wir dabei auf das Tagesgeräusch der Straße, so werden einzelne Geräusche und Töne desselben besonders hervortreten. Beobachten wir in dieser Weise die Klänge eines Musikinstruments, so hören wir die Klangfarbe desselben auffallend verändert, indem einzelne Klänge bald mit großer Schärfe in unser Ohr dringen, bald verworren erscheinen. Die Erklärung dieser Erscheinung ist sehr einfach: Jedesmal, wenn Luftschwingungen auf die Membran treffen, welche mit den Schwingungen des Eigentones der Membran in der Zeitdauer genau übereinstimmen, so werden dieselben durch die Resonanz der Membran verstärkt und so aus dem Tongemenge hervorgehoben.

Fig. 564.



Frage 1025. Welches ist das sicherste und bequemste Mittel zur Wahrnehmung von Obertönen und in welcher Weise findet dasselbe zu diesem Zwecke Anwendung?

Antwort. Das beste Mittel zur Wahrnehmung der Obertöne sind die Helmholtz'schen Resonatoren oder Mitklinger: Es sind das gläserne oder metallene

Erkl. 948. Einfache Resonatoren kann man aus Lampenzylindern herstellen. Man kann ihre Wirkung folgendermaßen darstellen. Man streut auf den Rand des offenen Endes etwas Kork oder Hexenmehl. Wenn man in

Fig. 565.



der Nähe einen Ton erzeugt, der mit dem Grundtone des Resonators übereinstimmt, so fliegt das Pulver wirbelnd empor; bei anderen Tönen bleibt es ruhig liegen. Stellt man sich ein Lämpchen her, dessen Docht mit Vaselineoel gespeist wird, so erhält man eine kleine leicht erlöschende Flamme. Man setzt das Lämpchen dicht an die Oeffnung des Resonators und erzeugt den Ton; die Flamme erlöscht sofort. Die Töne kann man durch Anblasen von Glaszylindern erzeugen, in welche man die nötige Menge Wasser gegossen hat; das Anblasen geschieht zweckmäßig mittelst einer Messingröhre, die am Ende flach geschlagen ist. Die Entfernung des Zylinders vom Resonator darf beim Anblasen nicht mehr als etwa 20 cm betragen.

Hohlkugeln oder Röhren mit zwei Oeffnungen, siehe Fig. 565 und 566. Die eine Oeffnung *a* hat scharf abgeschnittene Ränder, die andere *b* ist trichterförmig und so geformt, dass man sie in das Ohr einsetzen kann. Ein solcher Resonator ist der vorher beschriebenen Resonanzflasche sehr ähnlich, nur dass hier anstelle der dort angewendeten künstlichen elastischen Membran das Trommelfell des Beobachters tritt. Hat man sich das eine Ohr verstopft und setzt an das andere einen solchen Resonator, so hört man die meisten Töne, welche in der Umgebung hervorgebracht werden, viel gedämpfter als sonst; wird dagegen der Eigenton des Resonators angegeben, so schmettert dieser mit gewaltiger Stärke in das Ohr hinein. Es wird dadurch Jedermann in den Stand gesetzt, den betreffenden Ton aus einer großen Anzahl von anderen Tönen herauszuhören; ja man bemerkt den Ton des Resonators gar im Sausen des Windes, im Rasseln der Wagenräder, im Rauschen des Wassers auftauchend.

Fig. 566.



Frage 1026. Inwiefern ist eine abgestimmte Reihe solcher Resonatoren ein wichtiges Mittel, welches dem musikalisch ungeübten Ohre erlaubt, eine Menge von Untersuchungen durchzuführen, bei denen es darauf ankommt, Kombinationstöne, Obertöne und andere Erscheinungen deutlich wahrzunehmen?

Antwort. Durch Anwendung einer abgestimmten Reihe von Resonatoren kann ein völlig musikalisch ungebildeter und selbst schwerhöriger Forscher akustische Studien treiben. Die in einem solchen Resonator eingeschlossene Luftmasse wird wie die Luftsäule in einerseits offenen, andererseits

Erkl. 949. Die folgende Tabelle enthält in der ersten Reihe die Tonhöhe einiger kugelförmigen Resonatoren, in der zweiten Reihe den Kugeldurchmesser und in der dritten Reihe den Durchmesser der Oeffnung *a* (siehe Fig. 565).

g^0	154 mm	35,5 mm
c'	130 „	30,2 „
e'	115 „	30 „
g'	79 „	18,5 „
c''	70 „	20,5 „

Eine Verengung der Oeffnung *a* hat eine Vertiefung des Eigentones des Resonators zur Folge. Die Resonatoren mit enger Oeffnung geben eine größere Verstärkung des Tones, erfordern aber auch eine genauere Uebereinstimmung mit der Tonhöhe des zu hörenden Tones. Da die kugelförmigen Resonatoren ziemlich kostspielig sind, hat Schubring solche aus zylindrischen Pappröhren hergestellt, deren Eigenton sich nach den Gesetzen über die tönenden Luftsäulen (siehe II. Bd. der Akustik) leicht berechnen läßt, da die Länge der gedeckten Röhre nahezu $\frac{1}{4}$ von der Wellenlänge ihres Eigentones beträgt. In den Boden, welcher die untere Oeffnung der Röhre verschließt, ist ein Glasröhrchen eingesetzt, welches in den Gehörgang des einen Ohres gesteckt wird, während man das andere Ohr zuhält. Für alle Töne von *c'* aufwärts sind die Röhren oben offen, für tiefere Töne werden sie, um unbequeme Dimensionen zu vermeiden, durch einen Deckel mit zentraler Oeffnung geschlossen. König hat röhrenförmige Resonatoren aus Messingblech angefertigt, Fig. 567, bei welchen sich die mitschwingende Luftmenge vergrößern und verkleinern läßt, mittelst einer Verschiebung, ähnlich wie bei den Fernröhren. Die nebenstehende Figur zeigt drei solcher Resonatoren von verschiedener Größe. Eine Reihe von 14 solchen Resonatoren, zu verwenden für sämtliche Töne vom Kontra *G* bis *e'''* liefert die Firma Max Kohl, Chemnitz zu Mk. 335.

geschlossenen Röhren nur dann in kräftig stehende Schwingungen versetzt, wenn durch die Oeffnung *a* die Schallwellen eines Tones einfallen, dessen Schwingungen mit denen des (den Dimensionen des Resonators entsprechenden) Eigentones des Resonators übereinstimmen, d. h. isochron sind. So oft der Eigenton des Resonators in einem Tongemische angegeben wird, hört das mit dem Resonator bewaffnete Ohr ihn gellend durch alle anderen Töne des Akkordes hindurchdringen. Schwächer wird es ihn aber oft auch hören, wenn tiefere Klänge angegeben werden, zu deren harmonischen Obertönen der Eigenton des Resonators gehört. Man nennt dergleichen tiefere Klänge auch wohl die harmonischen Untertöne des Resonatortones. Es sind die Klänge, deren Schwingungsperiode gerade 2-, 3-, 4-, 5- usw. mal so groß ist, als die des Resonatortones. Ist dieser also z. B. c'', so hört man ihn tönen, wenn ein musikalisches Instrument die Töne *c', f, c, As,* F, D, C usw. angibt.

Wird der Resonator zum Tönen gebracht, so beweist das, dass in den zusammengesetzten Schwingungen, welche ihn zum Tönen bringen, die dem Resonator entsprechende einfache Schwingung vorhanden ist, und dass solche aus den zusammengesetzten abgeschieden werden kann.

Fig. 567.



Frage 1027. Warum sind die kugelförmigen Resonatoren den zylindrischen vorzuziehen?

Antwort. Weil die kugelförmig umschlossene Luft für den Grundeigenton leichter als bei jeder andern Form ins Mitschwingen gerät, während andererseits ihre höheren Eigentöne nur sehr schwach und selten auftreten.

Frage 1028. Wie muß man verfahren, wenn der durch einen Resonator gesuchte Ton gegen die ihn begleitenden Töne sehr schwach ist?

Erkl. 950. Die bestimmten Töne, welche man zuweilen mittelst an das Ohr gehaltener Muscheln oder Röhren im Tagesgeräusche vernimmt, erklären sich durch die Wirkung der Resonatoren, als welche die Muscheln und Röhren die schwächeren im Geräusche enthaltenen Töne durch Mitschwingung der von ihnen umspannten Luftmasse verstärken.

Antwort. In einem solchen Falle läßt man den Resonator nicht ununterbrochen am Ohre, sondern gebraucht ihn intermittierend. Beim jedesmaligen Einschieben des schmäleren Resonatorendes in den Gehörgang wird dann der vorhandene fragliche schwache Ton vernommen werden. Wird aber auch bei diesem Verfahren der gesuchte Ton nicht wahrgenommen, so ist er in dem analysierten Klange nicht vorhanden.

Frage 1029. In welchem Apparate ist der Vorzug der Membranen, die Zusammensetzung der Klänge unabhängig vom Ohre zu zeigen, mit der Empfindlichkeit der Resonatoren verbunden?

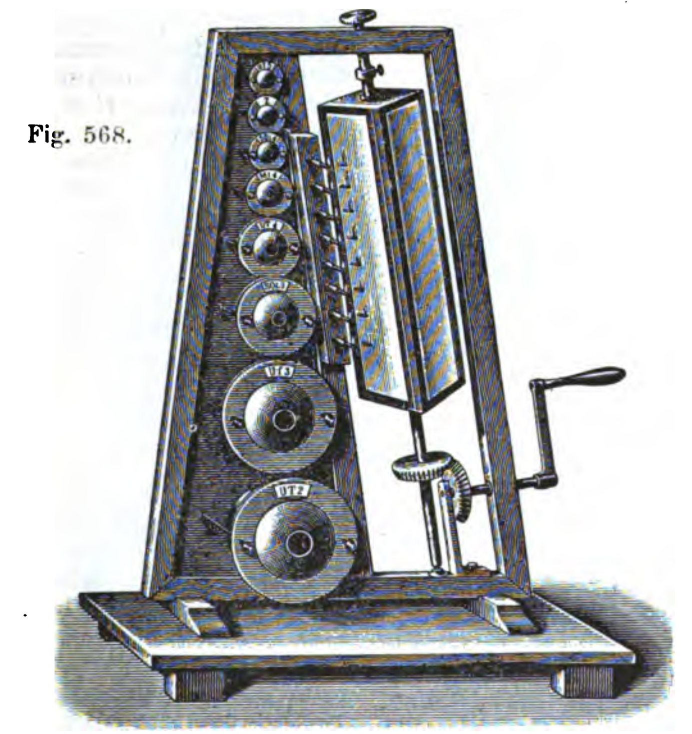
Erkl. 951. Die kleine Vorrichtung, auf deren Anwendung Rudolph Königs Methode beruht und welche den Namen „manometrische Kapsel" führt, haben wir schon im ersten Bande der Akustik, Seite 113 kennen gelernt. Wird durch einen außen angegebenen Ton die Luftmasse eines Resonators in Schwingungen versetzt, so pflanzt sich die Bewegung bis in die zugehörige Kapsel fort, und die die Kapsel vorn abschließende Membran wird geradeso in Schwingungen versetzt, wie das Trommelfell, wenn man das Röhrchen des Resonators in den

Antwort. In dem von König konstruierten Resonatoren-Flammen-Apparate. Auf einem lotrecht gestellten, aus Holz gefertigten Trapeze (Fig. 568) sind acht auf die harmonischen Töne von c^0 (128 Schw.) gestimmte Resonatoren übereinander so befestigt, dass die größeren, also tieferen unten liegen. Das kleinere Ende eines jeden der Resonatoren, welches sonst ins Ohr gesteckt wird, mündet in ein Kautschukrohr, welches am anderen Ende in je eine manometrische, mit einem Brenner für eine kleine Flamme versehene Kapsel luftdicht reicht. Mit Ausnahme der Eintrittsstelle des Kautschukschlauches sind die Kapseln rings geschlossen, und zwar an den Seitenwänden und hinten, wo der Schlauch eintritt,

Gehörgang einschiebt. Durch die Schwingungen der Membran wird auch die mit demselben Resonator in Verbindung stehende Flamme in isochrone Vibrationen versetzt, wodurch sie abwechselnd größer und kleiner wird.

Die Membranen in den Kapseln für die manometrischen Flammen werden so fein genommen, dass sie jeder Schwingung die in der sie umgebenden Luft erregt wird, folgen, und dass der Eigenton der Membran hierbei gar nicht in Betracht kommt. Wegen seiner Unveränderlichkeit ist ein dünnes Glimmerblättchen einer tierischen Membran vorzuziehen.

Zum Nachweis der Obertöne ist eine Zungenpfeife am geeignetsten. Eine solche vom Grundtone *c* (128 Schw.), welche in einem Kästchen eingeschlossen mit einem Schallbecher versehen auf eine Windlade aufgesetzt ist, gibt einen ungemein kräftigen, an Obertönen reichen Klang, welcher sich mit den entsprechenden Resonatoren leicht bis zum 16. und 20. wahrnehmen läßt.


Fig. 568.

fest, vorn, der Mündung des Schlauches gegenüber, durch eine sehr feine elastische Membran. Die jener Resonatorreihe in solcher Weise entsprechenden acht Flammen liegen also in einer Geraden, und zwar in einer möglichst kurzen, übereinander an der Seite des Resonatorenträgers. Parallel dieser Flammenreihe ist ein Spiegel aufgestellt. Wird letzterer rasch um seine Achse gedreht, so lösen sich die Bilder jener Flammen, welche einem erregten Resonator angehören, in ihre Elemente auf und zeigen Wellenlinien, während die mit den ruhig gebliebenen Resonatoren in Beziehung stehenden Flammen parallele kontinuierliche Lichtstreifen zeigen. Die von König zu diesem Apparate verwendeten Resonatoren sind *c, c', g', c'', e'', g'', b''* und *c'''*.

Lassen wir nun vor diesem Apparate einen Klang ertönen, des-

sen Grundton *c* ist, so zeigen die gezähnt erscheinenden Lichtstreifen an, von welchen harmonischen Tönen der Grundton des Klanges begleitet ist, wie auch, mit welcher relativen Intensität diese Töne existieren. Streicht man vor dem Apparate das *g* der Geige an, für welchen Ton derselbe keinen Resonator enthält, so vibriert die Oktave *g'* sehr stark, und das *c'* desselben Instrumentes löst zugleich mit der Flamme des Grundtones die der Oktave *c''* aus. Eine auf *c* gestimmte, nicht sehr weite offene Orgelpfeife versetzt bei starkem Anblasen die Flammen der ersten fünf Töne in Schwingungen, wobei der dritte Ton weit stärker vibriert als die Oktave. Eine gedeckte Orgelpfeife mit demselben Grundtone, läßt die Duodezime sehr stark und den Ton 5 nur sehr schwach erscheinen. Eine durchschlagende Zunge ohne Schallbecher löst die ersten 6 harmonischen Töne mit ziemlich gleichmäßig abnehmender Intensität aus.

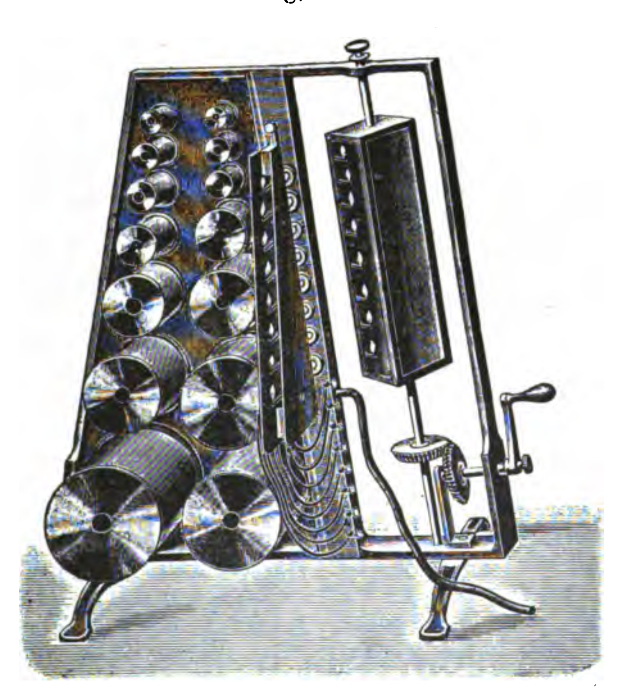
Frage 1030. Da der vorstehend beschriebene Apparat nicht gestattet, den Grundton des zu zerlegenden Vokals oder sonstigen Klanges nach Belieben zu wählen, so hat König noch ein zweites Modell konstruiert, um den Apparat auch für weitere Untersuchungen vollständig und zweckmäßig herzustellen. Wodurch unterscheidet sich dieser zweite Apparat wesentlich von dem oben erwähnten?

Erkl. 952. Die Klangbilder sämtlicher Töne desselben Instrumentes sind nie alle einander gleich, sondern die tiefsten Töne zeigen immer weit größere und kompliziertere Flammengruppen für jede einzelne Schwingung des Grundtones als die höheren, weil

Antwort. Die 8 Kugelresonatoren sind durch eine Reihe von 14 Universalresonatoren ersetzt (siehe Fig. 569). Diese Resonatoren bestehen aus einem Zylinder, etwa von der Länge des Durchmessers, welcher von zwei ineinandergeschobenen Röhren gebildet wird. Das äußere dieser Röhrenstücke läuft an einem Ende in eine Halbkugel aus, in welcher die Röhre für das Ohr ausgetrieben ist, wie bei den Kugelresonatoren. Das entgegengesetzte Ende der innern Röhre ist durch eine Platte verschlossen (Fig. 570), in deren Mitte sich die Oeffnung für die Kommunikation der eingeschlossenen Luftmasse mit der äußern Luft befindet. Diese Anordnung gestattet durch Aus-

die hohen harmonischen Töne, welche sich im Klange der tieferen Töne des Instrumentes noch bemerken lassen, beim Steigen des Grundtones mehr und mehr verschwinden. Je höher nämlich ein Ton ist, desto kleiner sind auch verhältnismäßig die Dimensionen des ihn hervorbringenden Mittels; die Schwingungen aller tongebenden Werkzeuge nehmen aber eine einfachere Form an, wenn die Dimensionen der


Fig. 569.



letzteren sehr klein werden, hauptsächlich weil die verschiedenen Könper dann die Fähigkeit verlieren, beim Schwingen Unterabteilungen zu bilden, durch welche die Partialtöne in den meisten Fällen erzeugt werden. Ein zweiter Grund ist der, dass solche Obertöne, welche sich im Klange eines tiefen Tones befinden, für einen höheren Ton dann oft in eine so hohe Gegend der Skala geraten, dass sie eine Wirkung nicht mehr äußern können.

ziehen der Röhre, die Luftmasse des Resonators zu vergrößern und seinen Eigenton etwa um eine Terz herabzustimmen. Auf der inneren Röhre sind die Linien verzeichnet, bis zu welchen man die äußere für die verschiedenen Töne herauszuziehen hat. Die tieferen Resonatoren der Reihe sind so konstruiert, dass der höchste Ton des größeren immer bis zum tiefsten des nächst kleineren reicht. Für die höheren würde dieses nicht ausgereicht haben, weil die sechsten, siebenten und achten Teiltöne schon so nahe aneinander rücken, dass man in den Fall kommen könnte, zwei von ihnen mit demselben Resonator bilden zu müssen; da alo greifen die höchsten Töne der tieferen über die tiefsten Töne der nächst höheren Resonatoren um einen ganzen Ton über, so dass die einzelnen Resonatoren der ganzen Reihe folgende Töne

Fig. 570.



enthalten: 1) *G-H*. 2) *H-dis*. 3) *dis-fis*. 4) *fis-a*. 5) *a-c'*. 6) *c'-e'*. 7) *e'-gis'*. 8) *gis'-c''*. 9) *c''-e''*. 10) *d''-f''*. 11) *e''-gis''*. 12) *f''-a''*. 13) *gis''-e'''*. 14) c'''-d'''.

Die mechanischen Präzisions-Werkstätten von Ferdinand Ernecke, Berlin SW., liefern den Apparat mit 8 Kugelresonatoren zu Mk. 285, den Apparat mit 14 Universalresonatoren zu Mk. 575 sowie neun kegelförmige gedeckte Resonatoren wie Fig. 570 zu Mark 37.

Frage 1031. Wie kann man schließlich auch verfahren, um die in einem Klaviere oder überhaupt auf einem Resonanzboden ausgespannten Saiten als Mittel zur Zerlegung eines Klanges zu benutzen?

Erkl. 953. In der Regel hört man die ungeradzahligen Partialtöne (den 3., 5., 7.) leichter als die geradzahligen (wie den 2., 4. usw.) So hört man die den Grundton *c* begleitenden Partialtöne *g'* und *e''* leichter als *c'* und *c''*.

Will man die Obertöne beobachten, so muß man die Aufmerksamkeit besonders auf dieselben richten, indem man unmittelbar vor dem Klange, welcher zerlegt werden soll, denjenigen Ton erklingen läßt, welchen man aufsuchen will. Man schlägt z. B. auf einem Klaviere zunächst *g'* an und indem man die Taste verläßt, so dass deren Saite nicht mehr fortklingen kann, schlägt man kräftig den Ton *c* an, man wird dann den Ton *g'* aus dem Klange von *c* heraushören. Ebenso, wenn man zuerst *e''* und dann *c* anschlägt. Nimmt man den gesuchten Ton nicht sofort wahr, so halte man einen auf denselben Ton abgestimmten Resonator an das Ohr, und man hört dann den Ton sehr laut. Ist so das Ohr auf diesen Ton aufmerksam geworden, so hört es denselben auch nach

Antwort. Drückt man die Taste einer Klaviersaite langsam nieder, so befreit man sie von ihrem Dämpfer, welcher die Saite nicht ins Schwingen kommen läßt, wenn er sie berührt. Befreit man in solcher Weise z. B. die Saite C (64) von ihrem Dämpfer und schlägt die Saite c (128) an, so hört man bei der freien Saite *C* den Oberton *c* mitklingen. Es unterliegt keinem Zweifel, dass dieser Ton von der Saite *C* herrührt, denn die angeschlagene Saite c kann wegen des anliegenden Dämpfers nicht nachtönen. In gleicher Weise läßt sich durch Anschlagen der Saite *G, c, e, g, b, c', d', e', f'* die freie Saite *C* mit den genannten Obertönen durch Resonanz zum Tönen bringen.

Man kann auch am Klaviere die Saiten für die höheren Töne z. B. *c* vom Dämpfer frei machen und die Saiten für die tieferen Töne, z. B. *C* anschlagen. Die in dem tieferen Klange enthaltenen Obertöne bringen sodann die freie Saite durch Resonanz zum Ertönen. Da auch hier die angeschlagene Saite sogleich durch den Dämpfer zum Schweigen gebracht wird, so kann der Ton nur

Entfernung des Resonators, allerdings schwächer aber deutlich. Das geübte Ohr nimmt die einzelnen Obertöne einer Klangmasse auch ohne Hilfe der Resonatoren wahr, so dass damit das Ohm'sche Gesetz (Seite 244) vollständig bewiesen ist.

von der freien Saite *c* herrühren. Ueberdies kann man sich hiervon auch noch durch die Bewegung kleiner, auf die betreffenden Saiten aufgesetzter Papierreiterchen überzeugen. Man sieht die letzteren auf der Saite *C* in Ruhe und auf jener *c* in Vibration.

Auch die angeschlagenen Akkorde *G, c* und *e, c, g* und *e, g* und *c'* bringen die freie Saite des Kontra-*C* mit den gleichen Dreiklängen zum Nachklingen.

Frage 1032. Welches noch bessere Verfahren kann man zur Ermittelung der Obertöne einer Klangmasse einschlagen, wenn man ein Monochord oder eine Violine zu Hilfe nimmt?

Antwort. Man gibt den Oberton, welchen man zu hören wünscht, erst als Flageolett- (oder Vogel-) ton der Saite an, indem man sie streicht, während man einen Knotenpunkt des entsprechenden Tones auf der Saite leise mit einem Finger oder mit einem Haarpinsel berührt. Will man also den 3. oder 5. Partialton hören, so muß man einen Punkt berühren, der $1/3$ resp. $1/5$ der Saitenlänge abschneidet. Bringt man nun die Saite zum Tönen, bald mit Berührung des Knotenpunktes, bald ohne eine solche Berührung, so hört man bald den gesuchten Oberton, bald die ganze Klangmasse der Saite, in welcher man dann den betreffenden Oberton bald wahrnehmen wird.

Erkl. 954. Thomas Young hat zuerst nachgewiesen, dass, wenn man eine Saite in einem solchen Punkte ihrer Länge zupft oder streicht, welcher Knotenpunkt eines ihrer Obertöne ist, dass dann diejenigen einfachen Schwingungsformen, welche in dem angegriffenen Punkte einen Knoten haben, in der Gesamtbewegung der Saite nicht enthalten sind. Greifen wir also eine Saite gerade in der Mitte ihrer Länge an, so fehlen alle den geradzahligen Partialtönen entsprechenden Schwingungen, und die Saite erhält einen hohlen, näselnden Klang. Greifen wir die Saite in $1/3$ ihrer Länge an, so fehlen die dem 3., 6., 9. Teiltone entsprechenden Schwingungen; greifen wir in $1/4$ ihrer Länge an, so fehlen die des 4., 8., 12. Teiltones.

γ) Zusammensetzung der musikalischen Klänge aus Partialtönen. (Synthese des Klanges).

Frage 1033. Welche Erscheinung können wir beobachten, wenn wir bei einem Klaviere das rechte Pedal niedertreten, so dass alle Saiten von ihren Dämpfern befreit, frei schwingen können, und nun mit kräftiger Stimme irgend einen Vokal *A* oder *O* in der Höhe eines der Klaviertöne laut gegen die offen gelegten Saiten singen?

Antwort. Wir hören dann den Vokal *A* oder *O* ähnlich wie beim Echo aus dem Klaviere laut und deutlich zurückschallen. In ähnlicher Weise schallen *E, I, U, Au* usw. aus dem Klaviere, wenn diese Selbstlaute hineingesungen werden. Die Ursache davon ist das

Erkl. 955. Gleichwie wir eine Klangmasse in ihre Partialtöne zerlegen können, so können wir auch aus einfachen Tönen einen Ton von bestimmter Klangfarbe a u f b a u e n, also durch Z u s a m m e n s e t z u n g v o n K l ä n g e n, die oben erhaltenen Resultate ihrer Zerlegung bestätigen. Gibt eine Klarinette einen etwas länger anhaltenden Ton vor einem offenen Klaviere an, dessen Dämpfer aufgehoben ist, so schwingen die Saiten, die durch die einfachen Töne des zusammengesetzten Klarinettenklanges erregt werden, so stark mit, dass dieser Klang auch noch gehört wird, wenn die Klarinette nicht mehr tönt. Mittönen entsprechender Saiten. Die Vokale sind nämlich aus vielen musikalischen Tönen zusammengesetzt, welche die gleichgestimmten Saiten, und jene Saiten, welche die gleichen Obertöne enthalten, durch Mitschwingen ins Klingen bringen, so dass dieselben den gesungenen Ton mit d e r s e l b e n K l a n g f a r b e wiedergeben.

Frage 1034. Durch welchen einfachen, leicht zu wiederholenden Versuch mit zwei Glasflaschen hat v. Helmholtz bewiesen, dass durch die gleichzeitige Wahrnehmung zweier oder mehrerer Töne ein Ton von ganz verschiedener Klangfarbe entstehen kann?

Fig. 571.



Erkl. 956. Ein interessanter Versuch, der von A. M. Mayer herrührt (1874), besteht darin, dass man aus einer seitlichen Wand einer Zungenpfeife ein kreisrundes oder quadratisches Stück herausschneidet, und die so entstandene Oeffnung durch eine Membran verschließt; einen Punkt der letzteren bringt man mit einer Reihe harmonischer Stimmgabeln durch ebensoviel passend gespannte Fäden in Verbin-

Antwort. Zwei gleich große Glasflaschen mit weiter Mündung, deren Eigentöne man ermitteln kann, wenn man einen horizontalen Luftstrom über ihre Mündung bläst, werden durch Eingießen von Wasser in die eine derselben so abgestimmt, dass die eine genau die Oktave der andern gibt. Das bequeme Anblasen derselben erfolgt mittelst abgeplatteter, einen schmalen Spalt bildender Kautschukschläuche, welche mit einem Blasebalge in Verbindung stehend, konstante Luftströme über die Flaschenmündungen leiten. Die Flaschen können auf diese Weise sowohl gleichzeitig angeblasen, als auch einzeln zum Tönen gebracht werden, je nachdem man beide Schläuche frei läßt oder einen derselben zudrückt.

v. Helmholtz hatte bei seinen Versuchen die größere Flasche auf den Ton *b* (230 Schw.), die andere auf b' (460 Schw.) gestimmt. Bläst man die tiefere Flasche allein an, so erhält man einen fast einfachen Ton, dessen Klangfarbe einem dumpfen *U* sehr ähnlich ist; bläst man dagegen beide Flaschen zugleich an,

dung. Jede Stimmgabel wählt alsdann aus der zusammengesetzten Bewegung der Membran diejenige einfache Schwingung aus, die ihrem Eigentone entspricht, und weist damit das Vorhandensein dieses Tones nach, wenn sie selbst in Schwingungen gerät. Derselbe Apparat dient auch zur Zusammensetzung des betreffenden Klanges; denn wenn die Pfeife aufhört zu tönen, schwingen die Stimmgabeln noch eine zeitlang fort, und die Summe ihrer Schwingungen, die auf die Luft und das Trommelfell übergehen, erzeugen den Klang der Pfeife.

so hört man einen Klang von der Höhe des Grundtones, dessen Farbe aber derjenigen des Vokals *O* gleich ist. Läßt man nun abwechselnd bald die eine, bald beide Flaschen tönen, so kann man in dem Zusammenklange zunächst die einzelnen Töne leicht unterscheiden, sehr bald aber, bei dauerndem Zusammenklange, verschmelzen sie zu dem Klange *O*. Wenn man erst den höheren Ton angegeben hat, dann den tieferen hinzukommen läßt, hört man anfangs den höheren Ton noch in seiner ganzen Stärke weiter, daneben klingt der tiefere in seiner natürlichen Klangfarbe wie ein *U*. Allmählich aber wird der isoliert gehörte Ton immer undeutlicher und schwächer, und man erhält nur den Eindruck eines einzigen Tones von der Höhe des tieferen Tones (*b*), aber von der dem Vokale *O* entsprechenden Klangfarbe.

Frage 1035. In welcher Weise hat v. Helmholtz die Zusammensetzung von Klängen mit Hilfe von Stimmgabeltönen gezeigt?

Antwort. Helmholtz konstruierte den sogenannten „V o k a l - a p p a r a t", mit dessen Hilfe man Klänge und besonders die Vokalklänge aus r e i n e n, e i n f a c h e n Tönen zusammensetzen kann. Reine und einfache Töne erhält man mittelst Stimmgabeln (Fig. 572), welche vor einer Resonanzröhre *z* zum Schwingen gebracht werden, vorausgesetzt, dass der Grundton der Röhre der nämliche ist, wie jener der Stimmgabel.

Da es bei diesen Versuchen darauf ankommt, mehrere Stimmgabeln g l e i c h z e i t i g zur Bewegung anzuregen und ihre Schwingungen l ä n g e r e Z e i t i n u n v e r ä n d e r t e r S t ä r k e zu erhalten, so befinden sich die oberen Enden der Stimmgabelzinken (*a*) zwischen den Schenkeln des Elektromagneten *b b*, gerade

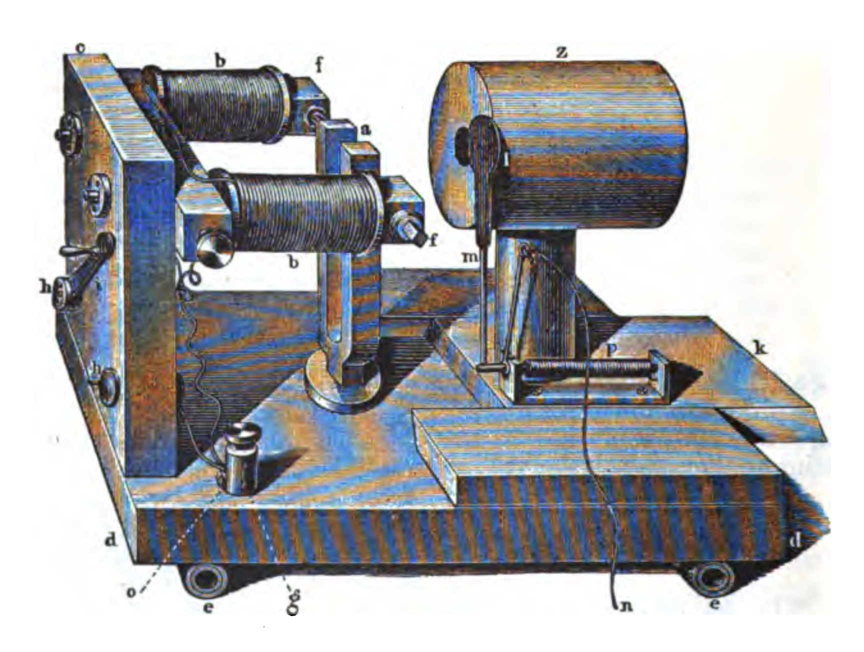
Erkl. 957. Ist die Unterbrechungsgabel mit der Stimmgabel Fig. 572 genau isochron, so wird die Gabel *a* jedesmal, wenn sich die Zinken nach außen bewegen, eine kurze Zeit vom Elektromagneten angezogen, sie erhält also bei jeder Schwingung einen neuen Antrieb, und ihre Bewegung dauert ungeschwächt fort, so lange der Stromunterbrecher in Tätigkeit ist. Dasselbe ist aber auch der Fall, wenn eine der Gabeln genau 2, 3, 4 . . . *n*-mal so rasch schwingt wie die Unterbrechungsgabel, nur dass die Gabeln dann erst nach je 2, 3, 4 . . . *n* Schwingungen einen neuen Anstoß erhalten. Diesen genauen Isochronismus der Gabeln kann man

dadurch herstellen, dass man auf der Unterbrechungsgabel durch veränderte Stellung eines kleinen Schiebers die Schwingungen etwas beschleunigen oder verzögern kann.

Erkl. 958. Die Stimmgabeln sind so gewählt, dass sie, angeschlagen und frei in die Luft gehalten, kaum hörbar

den Polflächen desselben gegenüber. Die Schwingungen der Gabel werden durch intermittierende elektrische Ströme erregt, welche den Elektromagneten während jeder Schwingung der Gabel, und zwar in dem Momente magnetisch machen, in welchem die Zinken der Gabel beginnen, auseinander zu schwingen. Zur Erzeugung der intermittierenden Ströme, welche in einem bestimmten Verhältnisse

Fig. 572.



sind. Damit dies auch bei geschlossener Resonatorröhre der Fall ist, müssen Stimmgabel und Fußbrett des ganzen Apparates auf einem Schallisolator (einem weichen, nicht tönenden Körper, z. B. Tuch oder Kautschukschläuchen) ruhen. Dadurch wird das Mittönen der harten Unterlagen, also die störende Verstärkung des Stimmgabeltones, verhütet.

Da die Gabeln aus Stahl verfertigt sind, so werden sie alle (mit Ausnahme der Unterbrechungsgabel) vorher magnetisch gemacht. Der elektrische Strom wird dann in der Weise durch die Elek-

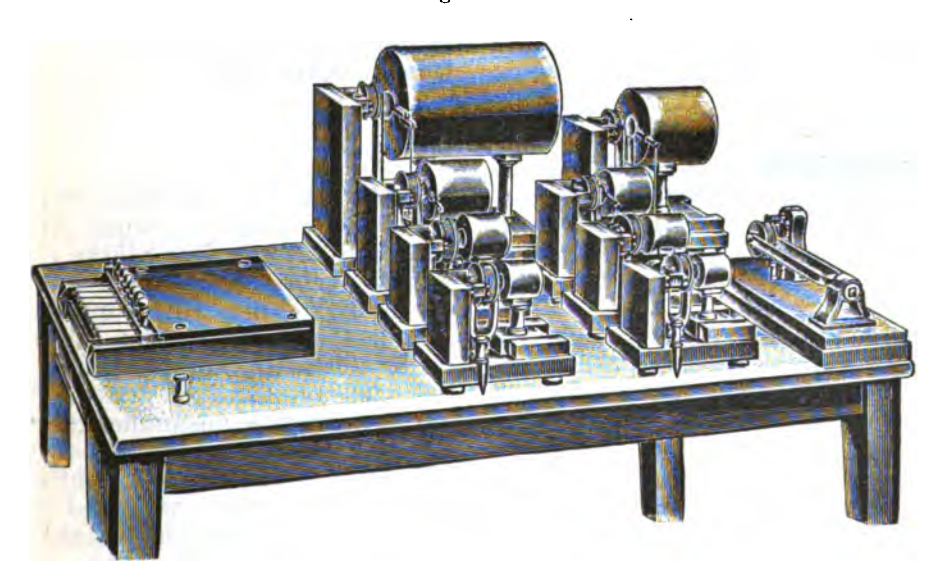
zur Schwingungszahl der Gabel unterbrochen werden müssen, wandte Helmholtz eine Elektrizitätsquelle mit Selbstunterbrechung durch eine elektromagnetische Stimmgabel an, die wir bereits im II. Bande der Akustik, Seite 46 kennen gelernt haben. (Siehe Erkl. 957.)

Die auf solche Weise erregten Schwingungen der Stimmgabel *a* Fig. 572, geben keinen hörbaren Ton. Um denselben hörbar zu machen, ist vor der Gabel eine Resonanzröhre *z* angebracht, welche

tromagnete gesendet, dass je ein Pol des Elektromagnets mit der benachbarten Gabelzinke **ungleichnamig** magnetisch ist, also Anziehung erfolgen muß. Die Unterbrechungsstimmgabel hat in der Regel dieselbe Tonhöhe wie die tiefste der übrigen Stimmgabeln.

Um einzelne Elektromagnete und also auch das Schwingen der entsprechenden Gabeln schnell ausschalten zu können, legt man Fig. 572 die an der vertikalen Wand des Apparates befindliche Messingkurbel *i* auf den unteren nahe befindlichen Messingzapfen *h*. Da die beiden Messingzapfen *h h* mit den entgegengesetzten Poldrähten verbunden sind, so geht nun der galvanische Strom auf diesem kürzeren Wege zum nächsten Elektromagneten, während der Elektromagnet *b b* untätig bleibt. Die **Firma E. Leybold's Nachfolger, Köln am Rhein**, liefert den großen Vokalapparat nach Helmholtz mit 10 Stimmgabeln für 10 harmonische Töne von $c^0 = 128$ zu Mk. 1300; einen etwas kleineren Apparat für 8 harmonische Töne zu Mk. 1100.


Fig. 573.



wie eine gedeckte Pfeife wirkend, in der Mitte des Bodens, welcher der Gabel zugewandt ist, in der Höhe der Gabelzinken eine kreisförmige Oeffnung hat. Befindet sich die Röhre mit geöffnetem Deckel nahe vor der Gabel, so wird sie, wenn ihr Grundton mit dem der Gabel übereinstimmt, wie eine Pfeife zum Tönen gebracht, und der Gabelton tritt ohne Oberton deutlich hervor. Den Verschluß der Resonanzröhren bewirkt ein Deckel *l*, welcher durch den von einer Spiralfeder herrührenden Druck vor die Mündung der Röhre geschoben wird. Beim stärkeren oder schwächeren Anziehen mittelst des Schnürchens *n* (Fig. 572) wird dieser Federkraft mehr oder weniger entgegengearbeitet, mithin die Resonatormündung mehr oder weniger geöffnet. Alle Schnüre enden in einer Tastenvorrichtung (siehe Fig. 573), so dass durch Niederdrücken einer Taste der zugehörige Resonator geöffnet wird. Um die Intensität des Resonatortones noch auf andere

Weise ändern zu können, und zwar ohne Einfluß auf die Schwingungsphasen, sind die Resonanzröhren auf einem Brettchen in einem passenden Einschnitte parallel zu sich selbst verschiebbar, so dass ihre Mündungen den Gabeln genähert oder von ihnen entfernt werden können.

Sämtliche Gabeln werden durch ein und denselben Strom von periodisch wechselnder Intensität in Bewegung gehalten. Mit einer Anzahl solcher Gabeln lassen sich nun Töne von gewisser Klangfarbe zusammensetzen; die Klangfarbe wechselt, wenn man durch teilweises Schließen der Resonanzröhren die Töne abschwächt und in der Phase abändert. Siehe die folgende Antwort.

Frage 1036. Wie kann man im allgemeinen mit Hilfe dieses Apparates sehr gut irgend eine Klangfarbe nachahmen?

Erkl. 959. Mischt man zu einem reinen Grundtone seine fünf ersten harmonischen Obertöne (die Oktave, die Quinte der Oktave, die Doppeloktave, die Terz und die Quinte derselben) jedoch in viel geringerer Stärke, als den Grundton, so bildet das Tongemisch einen Durakkord und liefert einen reichen, vollen, wohllautend und harmonisch klingenden Ton, wie es die Töne der offenen Orgelpfeifen, der Flöte und des Horns, des Klaviers und der mittelstarken menschlichen Stimme sind. Werden aber die höheren Töne noch zugemischt (besonders die, welche gegen einander unharmonisch sind), so wird die Klangfarbe scharf und rauh. Am schärfsten und rauhesten wird ein Klang, wenn der Grundton mit unharmonischen Obertönen gemischt ist, wie z. B. bei der stark angeblasenen Rohrflöte.

Antwort. Wenn jede Stimmgabel des vorbeschriebenen Apparates mit gewünschter Stärke einen von den einfachen Tönen angibt, die man bei der Zerlegung eines Klanges mit Hilfe der Resonatoren entdeckte, so entsteht durch das Zusammentönen tatsächlich der untersuchte zusammengesetzte Klang. Der Chor sämtlicher Gabeln gibt nahezu die sanfteren Töne des Hornes, während man mittelst einer gewissen Anzahl ungerader Obertöne den näselnden Klarinettenklang nachzuahmen vermag. In gleicher Weise lassen sich auch die verschiedenen Klangfarben der Orgelpfeifen erzeugen, so weit die zu Gebote stehenden Obertöne ausreichen.

Frage 1037. Warum gab von Helmholtz seinem Apparate den Namen „V o k a l - A p p a r a t", und welche Versuche führte er mit Hilfe desselben aus?

Erkl. 960. Zu seinen ersten Versuchen wandte Helmholtz acht Gabeln der beschriebenen Art an; die tiefste gab den Ton *B* (115 Schwingungen, d. i. jene Tonhöhe, mit der Bassstimmen sprechen), die übrigen gaben die sieben ersten Obertöne *b, f', b', d'', f'', as''* und *b''*. Die unterbrechende Gabel war auch von dem Tone *B*. Später ließ er noch vier weitere Obertöne hinzutreten, und benutzte dann als Grundton den der zweiten Gabel *b*.

Ist der Apparat mit geschlossenen Resonanzröhren in Gang gebracht, so hört man zunächst nur ein leises Summen. Oeffnet man dann den Resonator mit dem Tone *B*, so hört man ein dumpfes *U*, viel dumpfer als das *U* der menschlichen Sprache. Der Klang wird heller und deutlicher, dem gesungenen *U* ähnlicher, wenn man schwach den zweiten und dritten Ton *b* und *f'* mittönen läßt.

Der gedämpfte Grundton *B* mit einem starken *b'* und s c h w ä c h e r e n *b, f'* und *d''* lieferte ein klares *O*. Der mäßig starke Grundton *b* mit dem kräftigen *b'* und schwachem *f''* ließen zusammen ein *O* vernehmen. Da in beiden Fällen das *b'* kräftig ist, so ist dies der c h a r a k t e r i s t i s c h e Ton des Vokalklanges *O*.

Ein nach *O* gezogenes *A* entstand, als die Töne *d'', f'', as''* und *b''* möglichst stark genommen wurden, die tieferen dagegen gechwächt waren. *A, Ae* und *E* gelang es Helmholtz mit den 12 Gabeln von *b* an herzustellen. Dann gibt *b* allein *U*, dasselbe stark von *c'*, schwächer von *f''* begleitet *O*. *A* erhält man, *b* allein *U*, dasselbe stark von *b'*, schwämäßig stark, dagegen *b''* und *d'''* als c h a r a k t e r i s t i s c h e Töne kräftig tönen läßt. Um *A* in *Ae* überzu-

Antwort. Die V o k a l e der menschlichen Stimme besitzen die auffallendsten Unterschiede in der Klangfarbe; sie enthalten verhältnismäßig niedrige Obertöne und wenig begleitendes Geräusch. Sie eignen sich daher vor allen anderen Naturlauten am besten zur Nachahmung mittelst des Helmholtz'schen Klang-Apparates, und eben wegen dieser hervorragenden Eigenschaft wurde der Apparat von seinem Erfinder „V o k a l - A p p a r a t" genannt.

v. Helmholtz suchte zuerst die Vokalklänge aus jenen Partialtönen zusammenzusetzen, welche er bei der Zerlegung der Klänge mit Hilfe der Resonatoren erhalten hatte. Die künstlich hervorgebrachten Klänge verglich er mit den durch seine Stimme erzeugten. Das Resultat war ein günstiges, jedoch waren die mittelst des Apparates hervorgerufenen Vokaltöne im allgemeinen den g e s u n g e n e n Vokalen ähnlicher als den g e s p r o c h e n e n und zwar von jenem Klange wie die, welche aus einem Klaviere heraustönen, wenn man einen Vokal hineinsingt (siehe Antwort 1033). Dies hat seinen Grund darin, dass beim Stimmgabelapparate gleichwie beim Singen, der Grundton über die Nebentöne und etwaigen Geräusche herrscht, während es beim Sprechen umgekehrt ist. Am leichtesten entstanden die Laute *U, O* und *Oe*, weniger scharf *A*, welcher Laut noch die Obertöne *c'''* und *d'''* hat, für welche die Stimmgabeln fehlen. Für *E* und *I* reichte die Anzahl der vorhandenen Stimmgabeln (siehe Erkl. 960) vollends nicht mehr aus, indem diese Vokaltöne noch einige über *b''* hinausgehende Obertöne besitzen. Allein als Helmholtz auch diese Stimmgabeln nebst den zu-

führen, muß man b' und f'', die Nachbarn des tieferen charakteristischen Tones d'' etwas verstärken, b'' dämpfen, dagegen d''' und f''' möglichst stark hervortreten lassen. Für E muß man die beiden tiefsten Töne der Reihe b und b' mäßig stark halten als Nachbarn des tieferen Verstärkungstones f', und die höchsten f''', as''', b''' möglichst heraustreten lassen.

gehörigen Resonanzröhren noch nachschaffte, und zwar für die Töne d''', f''', as''' und b''' und b als Grundton annahm, kam zwar das A recht gut, aber der Laut E noch immer nicht so deutlich wie die vorhin genannten Vokale zum Vorschein, und auch das I war nicht befriedigend. Die Ursache hiervon liegt teils in der schwachen Bewegung der hochgestimmten Gabeln, also in der geringen Intensität der hohen Gabeltöne, teils scheint es, als ob noch einige höhere Obertöne fehlten.

Frage 1038. Mit Hilfe der Resonatoren und der anderen klanganalysierenden Mittel, die wir in dem vorigen Abschnitte kennen gelernt haben, konnte man sowohl die Zahl als auch die Stärke der in einem Klange enthaltenen Partialtöne ermitteln, aber es blieb zweifelhaft, ob auch die Phasendifferenz der den Klang bildenden Einzeltöne von Einfluß auf die Klangfarbe ist, weil durch die angewandten Methoden der Stand der Phasen nicht ersichtlich gemacht wird. In welcher Weise kann man dagegen bei der Synthese des Klanges mittelst des Stimmgabel-Apparates von Helmholtz bestimmte Abänderungen der Phasen in den Einzeltönen des Klanges bewirken?

Erkl. 961. Eine Schwächung der Tonintensität läßt sich bei dem Vokalapparate also in zweifacher Weise erzielen, einmal durch teilweises Schließen der Resonatormündung, wobei zugleich eine Phasendifferenz eintritt, ein anderes Mal, indem man die Mündung der Resonatorröhre ganz offen läßt und den Ton durch Zurückschieben der Röhre schwächt, wobei keine Phasenänderung eintritt. Helmholtz bewirkte bei der künstlichen Hervorbringung der Vokale

Antwort. Die Phasenänderungen der Einzeltöne, welche den Klang bilden sollen, kann man am Helmholtz'schen Stimmgabel-Apparate auf dreierlei Weise bewirken.

1) Am einfachsten, wenn man die Resonanzröhren durch Verkleinerung ihrer Mündung mit Hilfe der Schieber etwas tiefer stimmt und zugleich dadurch die Resonanz schwächt und die Phase ändert. Eine geringe Veränderung an dem genauen Einklange zwischen dem Grundtone der Gabel und jenem der Resonanzröhre bewirkt zwar anfangs nur eine kleine Schwächung der Resonanzstärke, aber eine bedeutende Aenderung der Phasen. Bei weiterer Verstimmung zwischen der Gabel und der Resonanzröhre nimmt der Phasenunterschied immer weniger zu als die Schwächung der Resonanz. Durch allmähliche Verkleinerung der Röhrenmündung kann der Phasenunterschied bis auf ¼ der Wellenlänge des betreffenden Tones gebracht werden.

2) Kehrt man in den Spulen eines Elektromagnetes (Fig. 572) die Richtung des galvanischen Stromes um, so wechseln auch die Pole dieses Elektromagnetes. Und da die Pole der konstant

die ganz gleiche Schwächung der betreffenden Töne bald auf die erste, bald auf die zweite Art, und fand keinen Unterschied in der Klangfarbe.

Als Helmholtz durch Polwechsel der Elektromagnete die Phasendifferenz der entsprechenden Teiltöne bis zu einer halben Schwingung steigerte und ihre Intensität durch Zurückschieben der gänzlich offenen Resonanzröhren bewirkte, war noch immer kein Unterschied in der Klangfarbe der künstlichen Vokallaute wahrnehmbar, verglichen mit jenen Fällen, für welche kein Phasenunterschied hervorgerufen worden war.

Endlich wurden die Versuche mittelst Umkehr der galvanischen Ströme bei gleichzeitiger Verstimmung durch Ankleben von Wachsstücken von Helmholtz wiederholt und gaben dasselbe Resultat.

magnetischen Stimmgabel die nämlichen geblieben sind, so erfolgt jetzt Abstoßung beider Stimmgabelzinken, während gleichzeitig von den Elektromagneten, in deren Gewinde der galvanische Strom nicht geändert wurde, Anziehung auf die Arme ihrer Gabel erfolgt.

Die Phase der Schwingungen der abgestoßenen Gabel ist also im Vergleich mit den Schwingungen der angezogenen Gabeln um ½ Wellenlänge verschieden.

3) Auch durch Ankleben von Wachsstückchen auf die Zinken der Stimmgabeln lassen sich diese verstimmen. Der Phasenunterschied wird hierbei desto größer, je stärker man die Verstimmung macht. Wie direkte Beobachtungen nach der Methode von Lissajou lehren (Seite 217), läßt sich jedoch hier die Phasendifferenz nicht über ¼ der Schwingungsdauer steigern.

Frage 1039. Welches war das Endresultat der diesbezüglichen Helmholtz'schen Untersuchungen?

Antwort. Die musikalischen Klangfarben unterscheiden sich nur durch die Anzahl, Stärke und Verschiedenheit (oder Schwingungszahl) ihrer Teiltöne voneinander, nicht aber durch die Phasendifferenz der letzteren.

Erkl. 962. Ein analoges Gesetz für die nicht musikalischen Geräusche konnte nicht festgestellt werden. Diese Geräusche beruhen entweder gar nicht auf regelmäßigen Schwingungen oder sie bestehen aus sehr hohen, sehr nahe beieinander liegenden Obertönen, für welche Helmholtz keine entsprechenden Gabeln zur Verfügung standen; auch wäre der Ton der letzteren jedenfalls zu schwach gewesen.

Frage 1040. Inwiefern ist man, dem vorstehenden Gesetze entgegen, zu der Annahme geneigt, dass eine Phasendifferenz eine Aenderung der Klangfarbe bedingen müsse?

Antwort. Weil bei der Zusammensetzung zweier Schwingungskurven unter der Annahme mehr oder weniger verschiedener Schwingungsphasen sehr verschie-

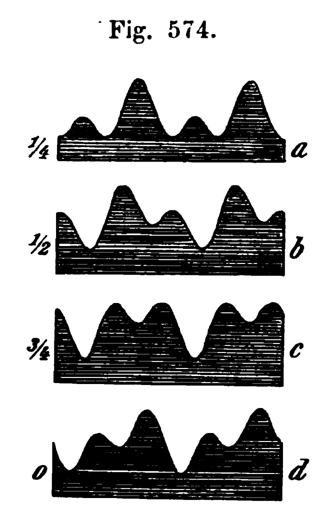


Fig. 574.

dene resultierende Kurven bei denselben zwei vereinigten Tönen entstehen, wie die nebenstehende Figur 574 zeigt, deren vier Kurven durch die Vereinigung von Grundton und höherer Oktave entstanden sind, und zwar bei den Phasendifferenzen von ¼, ½ und ¾ der Schwingungszeit. (Vergleiche damit die Kurven Fig. 529, von denen die nebenstehenden das Spiegelbild darstellen.) Schneiden wir derartig konstruierte Wellenlinien von dem Rande ebener oder zylinderförmig gebogener Platten ab, und lassen dieselben um eine Achse rotierend, durch den Luftstrom einer schmalen Windspalte gehen, so entstehen Töne, welche den verschiedenen Sinuskurven entsprechen, aus denen die betreffende Wellenlinie zusammengesetzt ist.

Frage 1041. In welcher Weise suchte R. König, entgegen der Helmholtz'schen Behauptung, nachzuweisen, dass die Phasendifferenz doch von merklichem Einflusse auf die Klangfarbe ist?

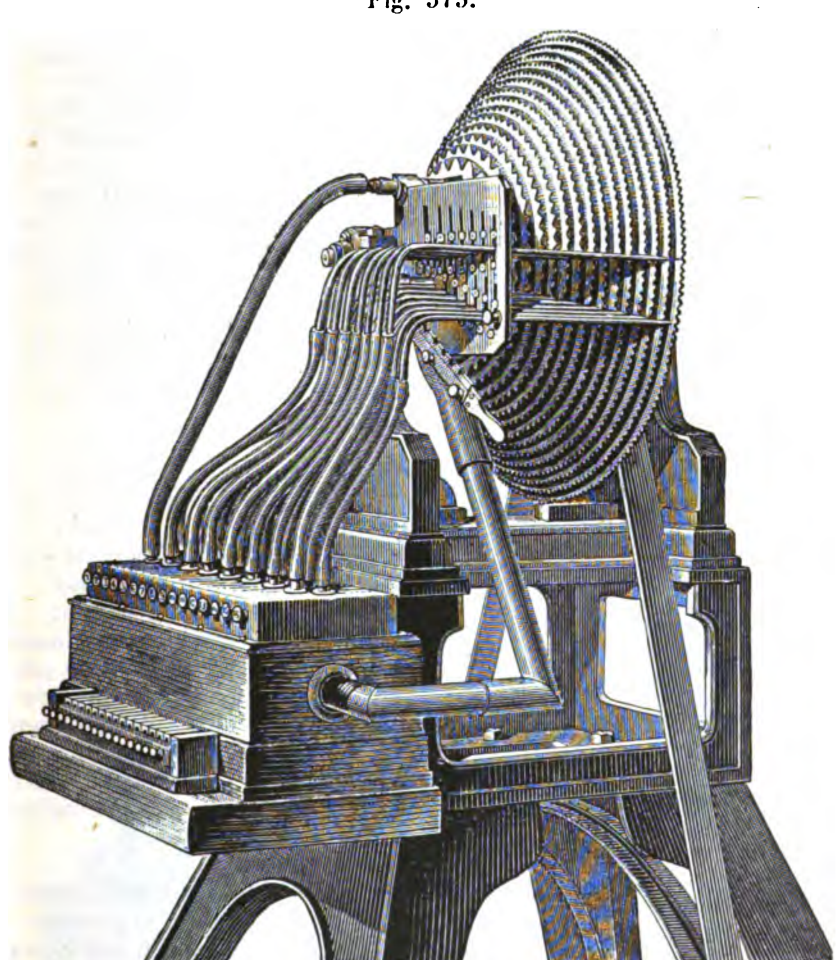
Antwort. Um dies zu zeigen, konstruierte König 1881 eine Wellensirene, Fig. 775, bei welcher man die zu untersuchenden Klänge aus einzeln hervorgebrachten harmonischen einfachen Tönen bildet, die durch das Anblasen von Sinuskurven erzeugt werden. Die Sinuskurven, (siehe Erkl. 964), welche die ersten 16 harmonischen Töne darstellen, sind an den Rändern von 16 Messingringen ausgeschnitten, deren Durchmesser vom ersten bis zum letzten progressiv größer werden, und welche in einer gewissen Entfernung hintereinander auf einem stufenförmigen Kegel von Gußeisen befestigt sind, der auf einer Achse sitzt. Beim Rotieren gehen diese Sinuskurven an Windspalten vorüber, durch welche sie angeblasen werden. Es entstehen hierdurch einfache Töne, so lange die Spalten sich in ihrer ursprünglichen Lage, d. h. in der Richtung

Erkl. 963. Wellensirene nennt König eine Vorrichtung, bei welcher ein Windstrom durch eine schmale Spalte gegen eine ausgeschnittene Wellenlinie von beliebiger Form gerichtet wird, in der Weise, wie man bei der gewöhnlichen Sirene meistens runde Löcher durch runde Windöffnungen anbläßt. Diese Wellenlinie kann entweder auf dem Mantel eines Zylinders, der um seine Achse rotiert, konstruiert und ausgeschnitten sein oder den Rand einer Scheibe bilden. Im ersteren Falle muß

dann die Windspalte parallel zur Achse des Zylinders, im letzteren in der Richtung eines Radius disponiert sein.

Um das Prinzip der Wellensirene bei seinen Untersuchungen anzuwenden, konstruierte König für jedes zu untersuchende Intervall mit großer Sorgfalt in sehr großem Maßstabe die aus der Vereinigung der beiden dem Intervalle zukommenden Sinuskurven entstehende Kurve, welche dann auf einen Kreis übertragen, photographisch auf die gewünschte Größe reduziert, und auf einer Metallscheibe genau ausgeschnitten wurde. Rotiert eine solche Scheibe mit ihrem in dieser Weise angeschnittenem

Fig. 575.



des Radius befinden, oder Klänge, bei denen die Grundtöne von einer Reihe regelmäßig an Intensität abnehmender harmonischer Töne begleitet sind, wenn man diesen Spalten eine schräge Stellung gibt.

Die Windröhren sind auf einer Platte montiert, auf welcher sie in konzentrierten Spalten verschoben werden können, um die Herstellung beliebiger Phasendifferenzen zwischen den einzelnen Tönen zu gestatten. Diese Verschiebungen werden vermittelst kammartig ausgeschnittener Platten bewirkt, welche man auf einem

Rande vor einer hinter ihr befestigten radialen Spalte, deren Länge mindestens gleich der größten Höhe der Kurve ist, so wird die Spalte periodisch nach dem Gesetze dieser Kurve verkürzt und verlängert, und bläst man Wind durch dieselbe, so wird dadurch auch eine dem gleichen Gesetze entsprechende Bewegung in der Luft erzeugt werden müssen, eine Bewegung gleich der, wie sie durch den Zusammenklang zweier wirklich einfachen Töne, ohne Beimischung von Obertönen, hervorgerufen werden würde.

Erkl. 964. Warum eine solche Wellenlinie Sinuskurve genannt wird, ist aus den beiden Figuren auf Seite 19 im ersten Bande der Akustik ersichtlich, indem die auf der Horizontalen $a\,b$ errichteten Lote die Sinus der Zentriwinkel bilden, durch welche sich der Radius derjenigen Kreisbahn bewegt, welche der Wellenlänge $a\,b$ der schwingenden Bewegung entspricht.

Erkl. 965. Die nebenstehende Beschreibung des in Fig. 575 dargestellten Apparates, welchen die Firma E. Leybold's Nachfolger in Köln a. Rhein zu dem Preise von Mk. 5400 liefert, wird genügen, um erkennen zu lassen, dass derselbe auch für viele andere Experimente verwendbar ist, vornehmlich aber für die künstliche Nachahmung der Klangfarben durch den Zusammenklang ein-

um die Achse des Apparates drehbaren Hebelarme befestigt, und gegen deren Zähne die Windröhren durch Kautschukbänder gedrückt werden. Bewegt man diesen Hebelarm aufwärts bis zu einer bestimmten Höhe, so hebt man dabei sämtliche Windspalten in die durch die Form des Kammes vorher bestimmte Lage. Die Windröhren stehen durch Kautschukschläuche, welche ihre Verschiebungen nicht hindern, mit einer Windlade in Verbindung, und der Wind, welcher durch Niederdrücken der Tasten in die Röhren getrieben wird, geht auf seinem Wege in der Windlade durch Löcher, die man durch Schieber mehr oder weniger schließen kann, um somit seine Intensität und also auch die der Töne beliebig zu regulieren.

Um dem Grundtone mehr Kraft zu geben, der, durch eine einzige Spalte angeblasen, wegen seiner Tiefe verhältnismäßig nur schwach ist, kann man den Wind gegen seine Sinuskurven nicht allein durch eine Windspalte blasen lassen, welche, wie die aller anderen Töne angeordnet ist, sondern auch noch durch vier Windröhren, die auf einem gemeinsamen Windkasten stehen, welcher direkt durch eine Röhre mit der Windlade in Verbindung steht.

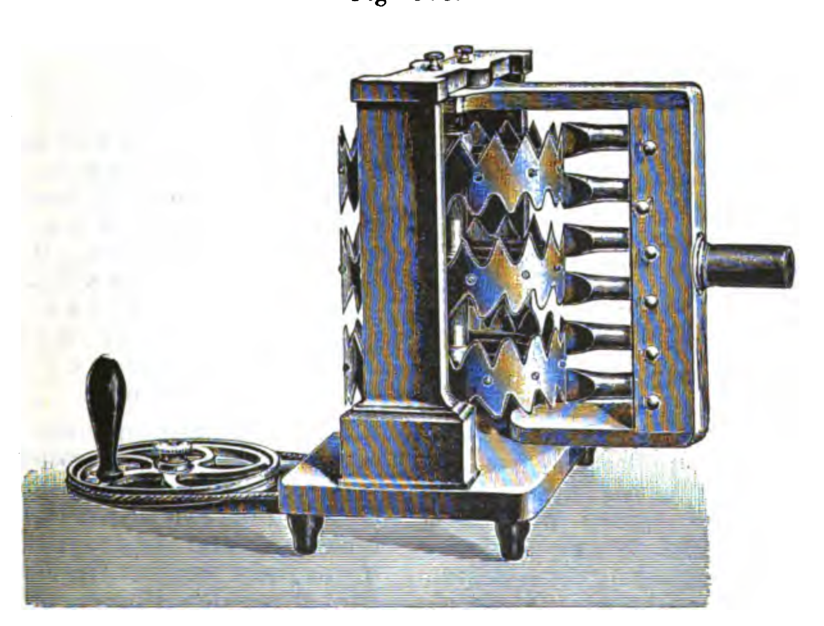
Der Apparat ist auf einem starken Gestelle von Gußeisen montiert und wird durch ein Schwungrad in Bewegung gesetzt. Man fängt damit an, dasselbe erst ganz langsam mit der Hand in Bewegung zu setzen, worauf man dann die Rotationsgeschwindigkeit allmählich so lange vergrößert, bis die Töne die gewünschte Höhe erreicht haben, auf welcher man sie infolge der beträchtlichen Masse des Kegels leicht konstant erhalten kann.

facher harmonischer Töne und Teiltöne für jeden beliebigen Grundton, von denen jeder sich sofort in einen Klang mit regelmäßig an Stärke abnehmenden Obertönen umwandeln läßt. Man kann außerdem die Intensität eines jeden dieser Töne nach Belieben regulieren und zwischen allen Tönen jeden gewünschten Gangunterschied herstellen. Es ist schließlich bis zu einem gewissen Grade auch möglich, jeden dieser rein harmonischen Töne in einen etwas verstimmten oder selbst in einen unharmonischen Ton zu verwandeln, wie dies für die Komposition von Tonmassen notwendig ist, in denen unharmonische oder nicht ganz rein harmonische Teiltöne enthalten sind.

Fügt man zu dem Grundtone zuerst nur noch die Oktave hinzu, so ist die Klangmasse bei der Phasendifferenz ¼ am lautesten, und hat zugleich in ihrem Charakter etwas Tieferes, als ob in ihr der Grundton mehr vorherrschend wäre; sie ist am schwächsten bei der Phasendifferenz ¾. Achtet man nur auf die Oktave, während man den Wechsel in der Phasendifferenz ausführt, so scheint dieselbe bei den Phasendifferenzen ¼ und ¾ ungefähr gleich stark zu sein, jedoch sehr merklich schwächer zwischen beiden.

Klänge, welche nur aus Tönen der ungeradzahligen harmonischen Reihe bestehen, deren Intensitäten sein mögen, welche sie wollen, sind bei den Phasendifferenzen ¼ und ¾ immer lauter und schärfer, als bei den Phasendifferenzen 0 und ½, lassen jedoch unter sich nicht den geringsten Unterschied wahrnehmen, wie auch die Klänge bei 0 und ½ unter sich identisch sind. Klänge aus harmonischen Tönen

Fig. 576.



Erkl. 966. Die Figur 576 zeigt noch eine andere Form der König'schen Wellensirene zur Beobachtung der verschiedenen Klangfarben dienend, welche von zwei gleichen harmonischen Tönen bei verschiedenen Phasendifferenzen hervorgebracht werden. Die Ränder von drei Blechstreifen sind so gezackt, wie es den Superpositionen

zweier Sinuskurven der 12 ersten harmonischen Töne mit den Phasenunterschieden 0, 1/4, 1/2, 3/4 bezw. den 6 ersten ungeraden harmonischen Tönen mit den Phasenunterschieden 0 und 1/4 entspricht. Eine Windlade mit 6 Ventilen und 6 Spaltöffnungen wird in Verbindung gebracht mit einem beliebigen Blasebalge. Die Achse mit den Blechstreifen läßt sich durch irgend einen passenden Antrieb in Rotation versetzen. Die Firma Ferdinand Ernecke, Berlin SW, liefert diesen Apparat zu Mk. 310.

Erkl. 967. Wenn man auf die Schwebungen achtet, welche z. B. bei einem Grundtone und seiner verstimmten Oktave auftreten, so hört man deutlich, dass während des Verlaufs jeder Schwingung die Klangfarbe des zusammengesetzten Tones sich ändert. Nun findet bei den Schwebungen wirklich eine fortschreitende Aenderung des Phasenunterschiedes zwischen den beiden Tönen statt, von welchem also die Klangfarbe abhängig ist. Nur ist hierbei zu bedenken, dass während der Schwebungen auch eine *Aenderung in der Tonintensität* auftritt, wodurch allein schon eine Aenderung in der Klangfarbe bedingt ist. Aber auch bei den Versuchen mit der Wellensirene kann die erhebliche Stärke der beiden in der Luft erregten einfachen Schwingungen schon mit dem Phasenunterschiede der Bewegungen zusammenhängen, womit der Apparat die Luftschwingungen erzeugt.

zusammengesetzt, welche sowohl der gerad- als der ungeradzahligen Reihe angehören, sind bei der Phasendifferenz 3/4 am schwächsten und bei der Phasendifferenz 1/4 am stärksten und schärfsten.

Aus seinen diesbezüglichen Untersuchungen hat König das folgende Gesetz abgeleitet: *Die Zusammensetzung einer Anzahl harmonischer Töne, welche sowohl der gerad- als auch der ungeradzahligen Reihe angehören, erzeugt, ganz unabhängig von der relativen Intensität dieser Töne, immer den stärksten und schärfsten Klang bei der Phasencoincidenz (Zusammentreffen der Phasen) von 1/4 ihrer Wellenlänge, den schwächsten und sanftesten bei der Phasencoincidenz von 3/4 ihrer Wellenlänge, und die Klänge bei den Phasendiffferenzen 0 und 1/2 stehen sowohl, was ihre Intensität, als auch was ihre Schärfe anlangt, immer zwischen beiden.*

Die Komposition einer Anzahl harmonischer Töne, welche nur der ungeradzahligen Reihe angehören, gibt bei den Phasendifferenzen 1/4 und 3/4 einen gleichen Klang, und ebenso einen gleichen Klang bei den Phasendifferenzen 0 und 1/2, der Klang bei den Phasendifferenzen 1/4 und 3/4 ist aber stärker und schärfer, als der bei den Phasendifferenzen 0 und 1/2.

„Wenn demnach auch wirklich die Klangfarbe hauptsächlich durch die Anzahl und die relative Intensität der harmonischen Töne bedingt wird, in welche sie sich zerlegen läßt, so ist der Einfluß

der Phasendifferenz zwischen diesen harmonischen Tönen auf dieselbe keineswegs zu vernachlässigen. — Man wird ungefähr sagen können, wenn der Wechsel in der Anzahl und relativen Intensität der harmonischen Töne Verschiedenheiten in der Klangfarbe hervorruft, wie sie an Instrumenten bemerkt werden können, welche verschiedenen Familien angehören, oder wie sie bei der menschlichen Stimme als verschiedene Vokale gehört werden, so ist doch der Wechsel in der Phasendifferenz zwischen diesen harmonischen Tönen noch immer imstande, mindestens so große Unterschiede in der Klangfarbe hervorzurufen, als verschiedene Instrumente derselben Gattung, und gleiche Vokale, von verschiedenen Stimmen gesungen, erkennen lassen."

Frage 1042. Mit Hilfe welches Apparates hat Franz Lindig Versuche über den Einfluß der Phasen auf die Klangfarbe angestellt, und welches war das Ergebnis seiner Untersuchungen?

Erkl. 968. Bei seinen oben erwähnten Untersuchungen mit den von ihm konstruierten Wellensirenen unterscheidet R. König harmonische Töne und Teiltöne von einander und charakterisiert dieselben mit den folgenden Worten:

Unter den Tönen, in welche sich die von einem vibrierenden Körper ausgehende Klangmasse zerlegen läßt, muß man die harmonischen Töne und die Teiltöne unterscheiden. Letztere entstehen dadurch, dass der Körper zeitweilig mehrere Schwingungsarten ausführt, welche verchiedenen Tönen zukommen, die er auch einzeln hervorzurufen imstande ist, während die harmonischen Töne ihren Ursprung in der Zerlegung der von der Pendelbewegung abweichenden Schwingungsform des

Antwort. Lindig hat mittelst der Telephonsirene von L. Weber diesbezügliche Versuche unternommen. Dieser Apparat besteht aus einer mit kleinen Magneten radial besetzten Scheibe, die in Umdrehung versetzt, in einem dem Rande genäherten Telephon einen Ton erzeugt, dessen Schwingungszahl sich aus dem Produkt der Umdrehungszahl und der Zahl der Magnete ergibt. Lindig benutzte bei seinen Versuchen Aluminiumscheiben und wählte zwei verschiedene Anordnungen der Magnete, eine, bei welcher alle Magnete den gleichen Pol nach außen kehrten und eine zweite, wo sie abwechselnd einen Nord- und einen Südpol nach außen kehrten, und stellte dem Rande der Scheibe 4 Spulen von umsponnenem Kupferdraht mit einem Kern von ausgeglühten Eisendrähten gegenüber, von denen je zwei zu einem System verbunden waren.

Körpers bei einem einzigen Schwingungsmodus in einfache Pendelbewegungen haben. Diese Teiltöne und harmonischen Töne unterscheiden sich ihrer Natur nach von einander dadurch, dass die letzteren die harmonischen Schwingungszahlen stets in absoluter Reinheit geben, die Schwingungszahlen der Teiltöne dagegen in Wirklichkeit sich immer nur mehr oder weniger den ihnen theoretisch zukommenden Werten nähern, und dieser Unterschied in der Natur beider Gattungen von Tönen läßt sich bei allen tönenden Körpern nachweisen, ihre Teiltöne mögen unharmonisch sein oder theoretisch mit Tönen der harmonischen Reihe zusammenfallen.

Beispiele für unharmonische Teiltöne findet man bei Stimmgabeln und bei Platten, und bei beiden bemerkt man stets, dass die Teiltöne weder mit dem Grundtone, noch untereinander in einem ganz festen Verhältnis stehen, denn die Teiltöne gleicher Ordnung bei zwei Stimmgabeln, deren Grundtöne im reinen Einklange sind, lassen immer mehr oder weniger schnelle Stöße hören, und hat man die Töne zweier Platten für dieselbe Klangfigur genau im Unisono gestimmt, so findet man die Töne derselben für andere Klangfiguren auch wieder nicht mehr im reinen Einklange.

Teiltöne, welche theoretisch mit harmonischen Tönen zusammenfallen, findet man zuerst bei Orgelpfeifen; aber sowohl bei den offenen wie bei den gedeckten Pfeifen weichen sie beträchtlich von den harmonischen Schwingungszahlen ab, indem sie eine mit den Ordnungszahlen der Obertöne progressiv zunehmende Erhöhung über die Töne der harmonischen Reihe erkennen lassen. Schon Wertheim bemerkte, dass man bei der Bestimmung des Grundtones einer Pfeife durch einen ihrer Obertöne immer eine um so größere Schwingungszahl für diesen erhält, als man einen höheren Oberton anwendet.

Ferner fallen auch die Teiltöne der Saiten theoretisch mit den harmonischen zusammen, und auch bei diesen

Während nun das eine System fest montiert war, war das andere verschiebbar und gestattete, die Phasen der Einzeltöne genau meßbar zu verändern, namentlich, wenn durch Verwendung zweier auf derselben Axe rotierender Scheiben mit verschiedener Anzahl von Magneten beliebige harmonische und unharmonische Intervalle hergestellt werden konnten; mittelst eines Telephons, oder optisch an den durch Resonanz erzeugten Schwingungen eines gespannten Drahtes konnten die Wirkungen beobachtet werden.

Die Versuche lehrten, dass die durch die Telephonsirene gelieferten Töne von einer Reihe harmonischer Obertöne begleitet sind, die gegen den Grundton um so mehr zurücktreten, je mehr Magnete sich auf der Scheibe befinden und je schneller diese rotiert. Wurde durch Drehen des beweglichen Elektromagnetsystems Phase ½ zwischen den ins Telephon gelangenden Wellensystemen hergestellt, so erlosch bei Wechselpolen die ganze Klangmasse, bei Gleichpolen aber trat die Oktave stark hervor. Durch Stromumkehr eines Elektromagnetsystems erlosch sowohl bei Wechselpolen als bei Gleichpolen der ganze Klang, ein Beweis dafür, dass die Obertöne und die sie bedingenden Oberschwingungen des Stromes nur in Phase 0 oder ½ zur Grundschwingung stehen können.

Lindig fand nun mit Hilfe der Phasenverschiebung, dass bei gleichliegenden Polen die Telephonsirene die ganze Reihe der harmonischen Obertöne erzeugt, bei Wechselpolen nur die ungraden Teiltöne. Als Ergebnis der Untersuchungen konnte folgender Satz aufgestellt werden: „Läßt man Magnete, sei es in gleicher oder in abwechselnder Polstellung, in

lassen sich Abweichungen von der absoluten Reinheit der Intervalle wahrnehmen, besonders bei Darmsaiten, wegen ihrer Unregelmäßigkeiten in der Form und Dichtigkeit des Materials, welche so groß sein können, dass zwischen den Tönen der beiden Hälften einer Violinsaite oft Unterschiede von einem halben bis zu einem ganzen Tone stattfinden, und man wird daher unbedingt annehmen können, dass im allgemeinen bei den Darmsaiten der musikalischen Instrumente die Teiltöne immer merklich von der Reinheit der harmonischen Intervalle abweichen. Wenn der Grundton einer solchen Saite von einem ihrer Teiltöne begleitet ist, so wird also die Form ihrer Schwingungen eine beständige Umwandlung erfahren müssen, und dieses nimmt man in der Tat wahr, wenn man in einem solchen Falle die Bewegung der Saite direkt aufzeichnet.

Im allgemeinen pflegt die Abweichung der Schwingung eines Körpers, während er nur einen seiner Eigentöne gibt, von der einfachen Pendelbewegung um so größer zu sein, und sein Klang somit auch aus um so zahlreicheren und stärkeren harmonischen Tönen zu bestehen, als die Amplituden seiner Vibrationen im Verhältnis zu seinem Querschnitte beträchtlicher sind. So kann man die harmonischen Töne bei Stimmgabeln nur wahrnehmen, wenn diese lange und dünne Zinken haben und mit verhältnismäßig weiten Amplituden schwingen. Bei Saiten, wo im Verhältnis zu ihrem Durchmesser die Schwingungen gewöhnlich eine beträchtliche Weite haben, kann man fast immer in ihrem Klange zahlreiche und starke harmonische Töne hören, welche mit den Teiltönen ebensowenig zu tun haben als die starken harmonischen Töne, welche man im Klange der durchschlagenden Zunge bemerkt, von irgend welchen Unterabteilungen der Zunge herrühren." (Wiedemanns Annalen, Band 14, 1881.)

gleichen Abständen kontinuierlich vor Elektromagneten vorbeieilen, so erzeugen sie in diesen periodische Wechselströme, die durch ein Telephon geleitet, auf dessen Membrane Klänge erzeugen, welche neben dem Grundtone harmonische Obertöne in Phase 0 zu diesem enthalten. Wechselpole erzeugen nur die ungeraden Obertöne."

In Bezug auf den Einfluß der Phase auf die Klangfarbe hat sich aus allen Einzelbeobachtungen folgendes allgemeine Gesetz ableiten lassen: „Verschiebt man zwei einfache Töne oder zwei Klänge, die ein beliebiges Intervall bilden, in der Phase gegeneinander, so hat dies auf die Klangfarbe des Intervalles keinen Einfluß. Ein Einfluß der Phasenverschiebung tritt nur dann auf, wenn in den Klängen gleich hohe Obertöne vorhanden sind, die miteinander interferieren können." (Drudes Annalen d. Physik 10. Bd. 1903. S. 268).

L. Hermann bestreitet den Einfluß der Phasen auf die Klangfarbe und glaubt ein ungleich feineres und untrüglicheres Mittel zur Entscheidung der Phasenfrage, als alle bisherigen (die Wellensirene eingeschlossen), in Versuchen mit dem neuen Edison'schen Phonographen gefunden zu haben, den er als die vollkommenste aller Wellensirenen bezeichnet. Er zeigte theoretisch, dass sowohl bei zeitlicher Umkehrung des akustischen Vorganges, wie auch bei Umkehrung aller Bewegungsrichtungen die Phasen aller Partialtöne unabhängig voneinander verändert, also ganz durcheinander geworfen werden. Trotzdem bleibt in beiden Versuchen die Klangfarbe unverändert. (Siehe Wiedemanns Annalen, 58. Bd., Seite 381 u. f.)

δ) Ergebnisse der klanganalytischen und klangsynthetischen Untersuchungen.

Frage 1043. Von welchen Faktoren ist die Stärke der Obertöne im Klange einer angeschlagenen Saite im allgemeinen abhängig?

Erkl. 969. Was die Art des Anschlages betrifft, so kann die Saite entweder gerissen werden, indem man sie mit dem Finger oder mit einem Stifte zur Seite zieht und dann losläßt, wie es z. B. bei der Harfe, Guitarre und Zither geschieht, oder die Saite kann mit einem hammerartigen Körper geschlagen werden, wie es beim Fortepiano geschieht.

Antwort. 1) Von der Art des Anschlages,
2) Von der Stelle des Anschlages,
3) Von der Dicke, Steifigkeit und Elastizität der Saite.

Frage 1044. Welches Gesetz gilt für jede Art des Anschlags?

Erkl. 970. Wird der Ton, wie bei der Aeolsharfe, durch Wind erregt, so kommen vorzugsweise die Partialtöne, und zwar in regelloser Abwechselung zum Vorscheine, wodurch der Klangcharakter stets wechselt. Wird eine Stahlsaite aber durch elektromagnetische Anziehung erregt, so treten infolge der kontinuierlichen und konstant gleichartigen Erregung die Obertöne vor dem Grundtone sehr stark zurück, und der Klang wird annähernd so voll wie der gestrichener Saiten.

Die Erregung einer Saite durch Schlag kann mittelst eines metallenen oder mittelst eines weichen elastischen Hammers erfolgen. Im ersten Falle entstehen viele hohe, mithin unharmonische Obertöne vor dem Grundtone, deren Schallkraft die des Grundtones überwiegen kann, wodurch ein klirrender leerer Klang entsteht.

Antwort. Für jede Art des Anschlags gilt das Gesetz, dass die Stärke und Zahl der hohen Obertöne um so größer ist, je mehr und je schärfere Intensität die Art der Erregung zeigt. Wenn die Saite mit einem spitzen Stifte gerissen wird, so hört man einen schärferen Klang mit einer größeren Menge hoher Obertöne, als wenn es (wie bei der Harfe oder Guitarre oder bei dem Pizzicato der Streichinstrumente) mit dem Finger geschieht; da im letzteren Falle die Einbiegungen der Saite weniger spitz sind. Doch ist die Stärke des Grundtones in beiden Fällen größer als die eines jeden Obertones.

Frage 1045. Von welchem Einflusse ist die Beschaffenheit des Hammers auf die Obertöne der damit geschlagenen Saite?

Antwort. Wird die Saite mit einem scharfkantigen metallenen Hammer geschlagen, der gleich wieder abspringt, so wird nur der

Erkl. 971. Aus der nebenstehenden Antwort ergibt sich der Grund, warum die Klavierhämmer mit dicken Lagen von stark gepreßtem und dadurch elastisch gewordenem Filze überzogen sind. Die äußersten Lagen sind die weichsten und nachgiebigsten, die tieferen sind fester. Die Oberfläche des Hammers legt sich ohne hörbaren Stoß an die Saite, und die tieferen Lagen geben namentlich die elastische Kraft, durch welche der Hammer wieder von der Saite zurückgeworfen wird. So lange der Filz des Hammers weich und elastisch ist, so lange ist der Ton ein klarer, und die unharmonischen Nebentöne werden nur wenig wahrgenommen. Sobald sich aber der Hammer abnutzt und hart wird, treten durch den harten Anschlag die sehr hohen und unharmonischen Obertöne hervor. und der Ton wird spröde.

Je dicker die Saite, desto länger muß der Hammer auf ihr ruhen, und je dünner, desto weniger elastisch kann der Hammer sein.

vom Schlage getroffene Punkt direkt in Bewegung gesetzt, die Saite zerlegt sich in viele Schwingungsteile (oder die Saite gibt scharfe Diskontinuität) und dementsprechend gibt das eine lange Reihe von Obertönen, deren Intensität zum großen Teile der des Grundtones gleichkommt.

Wenn der Hammer recht weich und elastisch ist, dann nimmt die Stärke der hohen Obertöne bedeutend ab, weil in diesem Falle die Schwingungsbewegung Zeit hat, sich auf der Saite auszubreiten, ehe der Hammer wieder zurückspringt. Am vollsten hört man den Grundton, wenn man mit dem weichen Finger die Saite zupft, wobei der Ton voll und doch harmonisch klingend ist.

Frage 1046. Welches Gesetz gilt bezüglich der Stelle des Anschlags?

Erkl. 792. Schlägt man eine Saite in ihrer Mitte an, so fällt ihr zweiter Ton fort, dessen einziger Knotenpunkt dort liegt. Der dritte Ton dagegen, dessen Knotenpunkte in $1/3$ oder $2/3$ der Saitenlänge liegen, tritt kräftig heraus, weil die Anschlagestelle in der Mitte dieser beiden Knotenpunkte liegt. Der vierte Ton hat seine Knotenpunkte in $1/4$, $1/2$ und $3/4$ der Saitenlänge. Er bleibt aus, weil die Anschlagestelle mit seinem zweiten Knotenpunkte zusammenfällt, ebenso der 6., 8., überhaupt alle geradzahligen Töne, während der 5., 7., 9. gehört werden. Durch das Ausbleiben der geradzahligen Töne klingt die Saite, in der Mitte angeschlagen, etwas hohl und näselnd.

Schlägt man in $1/3$ der Saitenlänge an, so fällt der 3., 6., 9. Ton fort. Auch

Antwort. Schlägt oder reißt man eine Saite an einer Stelle, wo der Knotenpunkt eines Obertones oder mehrerer Obertöne liegt, so fehlen alle diese Obertöne.

Bei dem Grundtone einer Saite gibt es kein Mittel, um das Mitklingen höherer Töne zu verhindern, weil nirgends ein Schwingungsknoten ist, und man also die Saite nirgends berühren oder dämpfen darf. Hingegen bei allen den Schwingungsarten, wo sich die Saite in gleiche Teile teilt, lassen sich durch Berührung der Schwingungsknoten alle diejenigen Töne ausschließen, bei welchen die berührte Stelle mitschwingen müßte, durch welches Mittel man also jeden Ton ganz rein ohne Bei-

dies gibt dem Klange etwas Hohles und Seichtes, obgleich viel weniger als der Anschlag in der Mitte. Wenn man mit der Anschlagestelle dem Ende der Saite sehr nahe rückt, so wird das Hervortreten sehr hoher Obertöne auf Kosten des Grundtones und der niederen Obertöne begünstigt, der Klang der Saite wird dadurch leer und klimpernd. Während bei gut konstruierten Klavieren die Partialtöne bis zum 6. sehr kräftig sind, fällt der 7. und 9. Partialton weg, weil bei den mittleren Saiten die Anschlagestelle auf $^1/_7$ bis $^1/_9$ der Saitenlänge verlegt ist.

mischung irgend eines anderen darstellen kann. Wahrscheinlich liegt der Grund, warum die Flageolettöne auf den Geigeninstrumenten sanfter klingen, als eben dieselben Töne, wenn sie auf die gewöhnliche Weise gegriffen werden, hauptsächlich darin, weil dabei nicht so leicht eine Beimischung anderer Töne stattfindet. (Chladni).

Frage 1047. Wovon wird, nach der vorstehenden Antwort, die Entwickelung eines schönen vollen Tones auf der Harfe und ähnlichen Instrumenten wesentlich abhängig sein?

Erkl. 973. Dass die Klaviere namhafter Fabriken ihren ganz bestimmten Klangcharakter haben, das hat seinen Grund in dem bei ihrem Baue angewandten Systeme, so daß dieselbe Werkstatt Instrumente gleicher Klangfarbe liefert. Das gleiche gilt auch von dem Baue der Streichinstrumente, insbesondere der Violinen.

Antwort. Von der richtigen Wahl der Angriffsstelle der Saite und sonach direkt vom Spieler. Da beim Klaviere der Angriffspunkt des Hammers festliegt und nicht nach dem Wunsche des Spielers verändert werden kann, so ist auch die Klangfarbe dieses Instruments eine unabänderliche. Durch den Anschlag lassen sich nur dynamische Abstufungen hervorrufen.

Frage 1048. Warum verwenden die Instrumentenmacher schwerere und weichere Hämmer für die tieferen Oktaven, leichtere und weniger weiche für die höheren Oktaven?

Antwort. Weil der Klang schärfer und spitzer wird, wenn man die Saite mit härteren Körpern schlägt, wohingegen man den Ton dumpfer machen kann, so dass der Grundton über die Obertöne herrscht, wenn man mit einem weichen und schweren Hammer schlägt.

Frage 1049. Welchen Einfluß hat die D i c k e und das M a t e r i a l der Saiten auf die Klangfarbe?

Antwort. Es können sich auf sehr steifen Saiten keine hohen Obertöne bilden, weil solche Saiten nicht leicht in kurzen Abteilungen

Erkl. 974. Um hohe Obertöne zu erzeugen, braucht man nur Saiten von ganz feinem Drahte mit einem Metallstifte zu reißen oder zu schlagen. Die Eigentümlichkeit der Zitherklänge beruht auf der Anwesenheit solcher hohen Obertöne. Die Darmsaiten sind bei gleicher Festigkeit viel leichter als Metallsaiten, und geben deshalb höhere Töne. (Wir haben bekanntlich im II. Bande der Akustik erfahren, dass die Schwingungszahl der Quadratwurzel aus dem spezifischen Gewichte umgekehrt proportional ist). Wegen der geringeren Elastizität der Darmsaiten werden ihre Töne (besonders die hohen) schneller gedämpft, als die der Metallsaiten; deshalb ist der Klang gerissener Darmsaiten weniger klimpernd als der von Metallsaiten.

entgegengesetzte Biegungen annehmen. Saiten, welche im Verhältnis zu ihrer Länge sehr dünn sind, geben, in entsprechender Weise angeschlagen, leicht viele hohe Obertöne, welche einander in der Skala sehr naheliegen und hierdurch ein eigentümlich unharmonisches Geräusch (das Klimpern) veranlassen.

Frage 1050. Was ist inbezug auf die Zahl und Intensität der Obertöne der Streichinstrumente zu bemerken, bei welchen nur Darmsaiten in Betracht kommen?

Erk. 975. Bis zum 6. Obertone sprechen die Saiten der Violine leicht an und sind auch gut zu hören; mit einiger Mühe bringt man es auch bis zum 10. Obertone; hierbei treten die Obertöne vom 6. bis zum 10. deutlicher hervor als die tieferen, wodurch die Schärfe in der Klangfarbe der Streichinstrumente bedingt wird. Der Grundton ist im Klange der Streichinstrumente verhältnismäßig kräftiger als in den nahe ihren Enden angeschlagenen oder gerissenen Saiten des Klaviers oder der Guitarre, weil die Erregung keine so beschränkte ist. Die gewöhnliche Stelle für das Anstreichen liegt in $^1/_{10}$ der Saitenlänge; streicht man näher beim Griffbrette an, so fällt der 5. oder 6. Teilton weg, und der Klang wird hierdurch etwas dumpfer.

Antwort. Es sind bei guter Ansprache der gestrichenen Saite alle Obertöne auf ihr vorhanden, welche bei dem bestehenden Grade der Steifigkeit der Saite sich bilden können, und zwar nach der Höhe hin in abnehmender Stärke. Die Schwingungsweite und Intensität des zweiten Tones ist $^1/_4$ von der des Grundtones, die des 3. Tones $^1/_9$ die des 4. $^1/_{16}$ usw. Es ist dasselbe Verhältnis in der Stärke der Obertöne, wie bei einer Saite, die man in ihrer Mitte reißt, nur dass in diesem Falle die geradzahligen Töne alle fehlen, welche bei der Anwendung des Bogens mit hervorgerufen werden.

Frage 1051. Was ist über die charakteristische Klangfarbe der Flötenpfeifen zu bemerken,

Antwort. Die musikalische Klangfarbe dieser Pfeifen hängt

und inwiefern wird dieselbe durch die Weite der Röhre sowie durch stärkeres Anblasen beeinflußt?

Erkl. 976. Bei den Flötenpfeifen beginnt die Tonbildung am Rande der Anblaseöffnung, an welchem sich der Luftstrom bricht und das zischende oder sausende Blasegeräusch erzeugt, welches aus einer Mischung vieler nahe beieinander liegender unharmonischer Obertöne besteht. Durch Resonanz verstärkt das Pfeifenrohr diejenigen Töne des Blasegeräusches, welche seinen Eigentönen entsprechen, so dass diese an Stärke die anderen im Geräusche enthaltenen Töne verdecken.

Die Holzpfeifen geben nicht so scharfes Blasegeräusch wie die metallenen. auch widerstehen ihre Wände nicht so gut den Erschütterungen durch die Schallwellen, wodurch die höheren Tonschwingungen leichter durch Reibung vernichtet werden. Holzpfeifen haben deshalb eine weichere und dumpfere Klangfarbe.

Konisch verengte Pfeifen, wie Gemshorn und Spitzflöte haben besonders den 5. und 7. Oberton deutlich und geben einen leeren hellen Klang. In der Oktave überblasene offene Pfeifen haben einen frischen, weichen, flötenähnlichen Klang.

wesentlich davon ab, ob die harmonischen Obertöne des angeblasenen Grundtones den Eigentönen der Pfeife hinreichend nahe liegen, um gleich dem Grundtone verstärkt zu werden oder nicht. Nur bei den engen zylindrischen Pfeifen (Flöten) entsprechen die höheren Eigentöne des Rohres genau den harmonischen Obertönen des Grundtones. Durch stärkeres Anblasen kann man die höheren Rohrtöne zum Ansprechen bringen. Gibt z. B. eine Flöte bei schwachem Blasen mit geschlossenen Löchern *d'*, so gibt sie bei immer stärkerem Blasen der Reihe nach den 1., 2., 3., 4. harmonischen Oberton von *d'*. Demnach werden bei solchen engen zylindrischen Pfeifen (namentlich wenn scharf geblasen wird) neben dem Grundtone auch eine Reihe seiner harmonischen Obertöne durch die Resonanz des Rohres verstärkt, was dem Klange eine schärfere geigenähnliche Färbung gibt. Bei den weiteren offenen Röhren dagegen sind die nächstliegenden Eigentöne des Rohres alle etwas höher, als die entsprechenden harmonischen Töne des Grundtones, letztere werden durch Rohrresonanz viel weniger verstärkt, deshalb geben weite offene Orgelpfeifen (Prinzipalstimmen) einen starken vollen Grundton mit sehr schwacher Begleitung von Nebentönen.

Frage 1052. Was ist über die Klangfarbe der gedeckten zylindrischen Pfeifen zu bemerken?

Erkl. 977. Bei den sog. Rohrflöten ist der 5. Teilton verhältnismäßig stark, wodurch der Klang etwas eigentümlich Helles erhält. Um den Kirchengesang der Gemeinde zu begleiten, haben die Prinzipalregister einen zu milden, die Geigenregister und Quin-

Antwort. Diese Pfeifen haben bei enger Mensur Eigentöne, welche den ungeradzahligen Teiltönen des Grundtones, also dem 3., 5. entsprechen. Bei den weiteren gedeckten Pfeifen liegen die Eigentöne der Luftmasse merklich höher als die entsprechenden Obertöne des Grundtones, weshalb letztere wenig oder nicht verstärkt werden. Weite gedeckte Pfeifen geben des-

taten einen schärferen aber schwächeren Klang. In diesem Falle wird das Mixturregister angewandt, in welchem jede Taste mit mehreren Pfeifen verbunden ist, die sie gleichzeitig öffnet, von denen die eine den Grundton, die anderen aber die ersten Obertöne desselben (meist die Oktave und Duodezime) geben.

halb, besonders bei schwachem Anblasen, den Grundton fast rein, engere lassen noch sehr deutlich den 3. Teilton, die Duodezime oder die Quinte der Oktave hören, weshalb sie auch Quintaten genannt werden. Da bei den gedeckten Pfeifen die geradzahligen Partialtöne fehlen, so ist ihr Klang hohl, dumpf und in der Tiefe weich.

Frage 1053. Was ist über den Klang der Zungenpfeifen zu bemerken?

Erkl. 978. Eine weite Resonanzkugel, die mit dem Grundtone einer Zunge übereinstimmt, verlöscht alle Obertöne derselben. Als z. B. Helmholtz über eine Messingzunge, wie sie in Orgeln gebraucht werden, und welche $b = 230$ gab, eine seiner größeren Resonanzkugeln als Ansatzrohr aufsetzte, welche gleichfalls auf b abgestimmt war, erhielt er bei starkem Drucke im Blasebalge einen vollen, starken und weichen Klang, dem fast alle Obertöne fehlten. Außerdem gibt eine Zungenpfeife, da sie an der Zunge als gedeckt anzusehen ist, nur die ungeradzahligen Obertöne.

Antwort. a) Bei freien Zungen ohne Schallbecher oder Ansatzrohr wird der Ton ausschließlich durch die Zunge erregt, deren Oeffnen und Schließen des Windspaltes Luftstöße verursacht, welche unmittelbar und frei an die umgebende Luftmasse übergehen. In diesen Stößen haben die Luftteilchen die verschiedensten Bewegungen; deshalb entsteht eine sehr lange Reihe von Obertönen, bis zum 20. und darüber. Die Zungenklänge sind daher scharf und knarrend, am meisten bei aufschlagenden Zungen, wo der Klang förmlich rasselnd wird, am wenigsten bei den weichen freien Stimmbändern des Menschen.

b) Durch Ansatzröhren wird der Klang der Zungen wesentlich verändert, indem diejenigen Obertöne beträchtlich verstärkt werden und aus der Klangmasse hervortreten, welche den Eigentönen des Ansatzrohres entsprechen, während die anderen Obertöne bis zum Verschwinden gedämpft werden.

Frage 1054. Was ist im allgemeinen über den Klang der Holzblasinstrumente zu bemerken?

Erkl. 979. Bei Orgel und Harmonium sind die metallenen Zungen immer nur für die Erzeugung eines Tones be-

Antwort. Der Klang der Holzblasinstrumente setzt sich, weil auch bei ihnen eine schwingende Zunge der Tonerreger ist, ebenfalls aus vielen Obertönen (jedoch verschiedener Ordnung) zusammen. Bei den als halbge-

stimmt. In den Holzblasinstrumenten dient dagegen eine einzige Zunge zur Erregung einer ganzen Notenreihe. Die leichten elastischen Holzzungen dieser Instrumente werden durch den wechselnden Druck der schwingenden Luft in Mitschwingung versetzt, wodurch sowohl die hohen Eigentöne der Zunge als auch andere weit tiefere Töne entstehen können, deren Höhe dadurch bestimmt ist, dass die in dem Instrumente entstehenden Luftwellen die Zunge merklich bewegen. Die ersten finden keine musikalische Anwendung, weil sie zu hoch und kreischend sind, vielmehr werden nur solche Töne hervorgebracht, welche den eigenen Tönen des an der Zunge gedeckten Rohres entsprechen.

deckte Röhren zu betrachtenden Oboe und Fagott können, vermöge ihrer konischen Bohrung, sowohl gerad- wie ungeradzahlige Töne auftreten, während bei der Klarinette, welche infolge ihrer zylindrischen Bohrung als gedeckte Röhre wirkt, nur die ungeradzahligen Obertöne auftreten. Dadurch erklärt sich der hohle etwas näselnde aber milde Klang des letzteren Instrumentes, während die Klangfarbe der beiden ersteren voller und schärfer ist.

Frage 1055. Was ist schließlich über die Klangfarbe der Blechinstrumente zu bemerken?

Erkl. 980. Die kegelförmigen, gewundenen Rohre ohne Klappen und Ventile können nur den Grundton und seine harmonischen Obertöne hervorbringen. Die verschiedene Form und Spannung der Lippen des Bläsers kommt nur soweit in Betracht, als dadurch bestimmt wird, welcher von den Eigentönen des Rohres anspricht, während die Höhe der einzelnen Töne von der Spannung der Lippen unabhängig ist.

Antwort. Die Blechinstrumente sind durch ihre Schärfe wie durch ihre Schallkraft allen anderen Tonwerkzeugen überlegen. Ihr rauher durchdringender Klang rührt von der Stärke vieler hoher, dissonanter Partialtöne her, die, je enger die Röhren im Verhältnisse zu ihrer Länge sind, um so gellender hervortreten. Daher ist der Klang der weitmensurierten Signalhörner, Kornette und Tuben viel weniger rauh, und insbesondere derjenige des Waldhornes bei aller Kraft und Fülle weich, wohllautend und gesangvoll, weil hier nur noch niedere Partialtöne zur Geltung kommen, während die enggebauten Trompeten und Posaunen glänzend, rauschend aber grell klingen.

Frage 1056. Welche Gesetze ergeben sich aus diesen Untersuchungen über den Einfluß der Anzahl, Höhe und Stärke der Obertöne auf die Klangfarbe?

Erkl. 981. Dem Gehöre nach wird niemand sagen können ob ein Schuß

Antwort. Als wesentlichste Resultate der Untersuchungen über Klangfarbe stellt Helmholtz folgendes zusammen:

1. Einfache Töne, wie Stimmgabeln mit Resonanzröhren und weite ge-

von einer Gußstahl-, oder Bronze-, oder Hartkupferkanone abgefeuert worden ist, ebensowenig unterscheidet sich der Knall, wenn ein Wergpfropfen aus einer Hollunderholz-, oder Metall-, oder Glasröhre abgedrückt wird, vorausgesetzt, dass diese nur gleich lang und gleich weit sind. Es fehlt also dem Knall die Klangfarbe. Dagegen ist es möglich, aus der Schallhöhe und aus der Schallstärke anzugeben, ob der Knall von einer Kanone oder einer Büchse oder Peitsche herrührt. Demgegenüber läßt sich darauf hinweisen, dass ein Jäger die Schüsse ihm bekannter Flinten aus hunderten anderer wiedererkennt. Das Rohr einer Flinte oder Büchse, selbst die großen Rohre der Kanonen haben viele Eigentümlichkeiten, welche mannigfach auf die Klangfarbe des Schusses einwirken. Aehnlich wie man durch verschiedene Form und verschiedenes Material die Klangfarbe von Orgelpfeifen mannigfach variieren kann, so üben auch die Verschiedenheiten der Kanonenformen, Belagerungs- und Feldgeschütz, Mörser usw. oder die der kleineren Schußwaffen, Büchse und Pistole, sowie andererseits die Verschiedenheiten des Materials, Gußstahl oder Bronze bei Kanonen, dickere oder dünnere Wandstücke bei Büchsen oder Flinten auf die Klangfarbe einen wesentlichen Einfluß aus, wie jedem Artilleristen bekannt ist. Es gibt gar keine Laute ohne Klangfarbe, selbst die Donner der Gewitter, die Explosionen der Torpedos und Detonationen bei vulkanischen Ausbrüchen haben ihre Eigentümlichkeiten, welche sich nur aus der Form der erzeugten Luftwellen erklären lassen.

deckte Pfeifen klingen weich und angenehm ohne alle Rauhigkeit, aber unkräftig und in der Tiefe dumpf.

2. Klänge, welche von einer Reihe niederer Partialtöne, etwa bis zum 6. hinauf, in mäßiger Stärke begleitet sind, sind klangvoller, musikalischer. Sie haben, mit den einfachen Tönen verglichen, etwas Reicheres und Prächtigeres. Hierher gehören die Klänge des Klaviers, der offenen Orgelpfeifen usw.

3. Wenn nur ungeradzahlige Partialtöne da sind, wie bei engen gedeckten Pfeifen, den in der Mitte geschlagenen Klaviersaiten, den Klarinetten usw., so bekommt der Klang einen hohlen, und bei größerer Zahl von Obertönen einen näselnden Charakter.

4. Wenn die höheren Obertöne jenseits des 6. und 7. sehr deutlich sind, so wird der Klang scharf und rauh. Bei geringerer Stärke beeinträchtigen die hohen Obertöne die musikalische Brauchbarkeit nicht, sie sind im Gegenteil günstig für den Charakter und die Ausdrucksfähigkeit der Musik. Von der Art sind die Klänge der Streichinstrumente, die meisten Zungenpfeifen, die Physharmonika usw. Solche Klänge, bei welchen die hohen Obertöne ganz besonders stark sind, wie bei den Blechinstrumenten, erhalten dadurch etwas ungemein Durchdringendes.

Frage 1057. Wie läßt sich nachweisen, dass auch das Material der Tonquelle die Klangfarbe derselben beeinflußt?

Antwort. Lassen wir zwei Pfeifen, welche an Gestalt und Tonhöhe vollkommen gleich aber von

Erkl. 982. Ganz besonders ist bei den Streichinstrumenten die Klangfarbe wesentlich abhängig von den zu ihrem Baue benutzten Holzarten, sowie von dem Lack. Dass solche Instrumente, wenn sie lange Zeit gespielt sind, eine schönere Klangfarbe gewinnen, mag daran liegen, dass sich die molekularen Schwingungsbewegungen des Materials allmählich mit den von den Saiten oder Luftsäulen ausgehenden primären Schwingungen in Uebereinstimmung setzen.

verschiedenem Holze sind, unter gleichem Winddrucke ertönen, so werden sie sich deutlich durch ihre Klangfarbe unterscheiden, was hingegen nicht der Fall ist, wenn sie aus derselben Holzart, womöglich aus demselben Brette geschnitten sind. Die Pfeife aus hartem Holze wird einen schärferen Klang geben. Selbst bei verschieden harten Holzarten sind Unterschiede wahrzunehmen. Ebenso zeigt ein Versuch, dass die Klangfarbe der Metallpfeifen eine andere ist als die der Holzpfeifen.

Frage 1058. Was nimmt man als Grund der vorstehenden Erscheinungen an?

Erkl. 983. Es läßt sich annehmen, dass die Klangverschiedenheit bei Flöten aus verschiedenem Materiale mit auf den in nebenstehender Antwort erwähnten Transversalschwingungen beruht, gleichwie auch die Klangverschiedenheit gleichgebauter Blechinstrumente und Zungen aus verschiedenen Metallen. Ganz besonders wird durch die Erschütterungen der Stürzen der schmetternde Klang der Trompeten und Hörner hervorgerufen, denn sobald man das Blasinstrument bei der Stürze anfaßt, wird der Schmetterklang, welcher auch durch die breite Fläche der Stürze begünstigt wird, schwächer.

Antwort. Man nimmt an, dass die Schwingungsenergie der Luftsäule der Festigkeit der Wände proportional ist; diese ist aber bei Metallpfeifen größer als bei Holzpfeifen, und bei Pfeifen aus hartem Holze größer, als bei solchen aus weichem Holze. Die fühlbaren Erschütterungen der Pfeifenwände beweisen aber das Vorhandensein tönender Transversalschwingungen, deren Klang im Gesamtklange der Pfeife notwendig mit enthalten sein muß.

Frage 1059. Woraus erklärt sich die magere Klangfarbe der Pianinos gegenüber den flügelartigen Klavieren?

Erkl. 984. Von wesentlichem Einfluße auf die Klangfarbe ist die Festigkeit, Elastizität und Dichte des Saitenmaterials, wie ja zur Genüge aus den im zweiten Bande gegebenen Formeln über Transversalschwingungen der Saiten hervorgeht. Die weniger schweren und elastischen Messingsaiten begünsti-

Antwort. Die ersteren haben kürzere Saiten, welche zur Erzeugung der tiefen Töne dick übersponnen und folglich weniger elastisch sind, als die längeren dünn überzogenen und straffer gespannten der Flügel, bei welchen überdies der Resonanzboden eine viel größere Fläche besitzt, als bei den Pianinos. Auch sind bei den letzteren die Saitenschwingungen nicht transversal zum Fußboden.

gen die Entstehung von mehr hohen Partialtönen auf Kosten des Grundtones, als die Stahlsaiten.

Frage 1060. Abgesehen von den Obertönen und dem Einflusse des Materials tragen besonders welche Nebenumstände in den meisten Fällen zum sofortigen Erkennen der Tonquelle bei?

Antwort. Den musikalischen Klängen mischen sich bei den meisten Methoden der Tonerregung charakteristische Geräusche als Folgen unregelmäßiger Luftbewegungen bei, welche meist zum sofortigen Erkennen der Tonquelle genügen. So erkennen wir den Klang der Flöten und Pfeifen an dem Sausen des sich an der Mundöffnung brechenden Luftstromes, den der aufschlagenden Zungen an ihrem Gerassel, während die mit dem Bogen gestrichenen Saiten ein deutliches Reibungsgeräusch hören lassen, welches bei der ungeschickten Bogenführung der Anfänger im Violinspiel unerträglich rauh und kratzend werden kann.

Erkl. 985. Der kurze Klang des „Pizzicato" auf einem Streichinstrumente unterscheidet sich sofort von dem volleren der Guitarre und Harfe; an dem eigentümlichen Klirren der Metallsaiten erkennen wir den Klang der Zither, an dem hörbaren Stoße des Hammers und dem raschen Verlöschen des Tones den Klavierklang; die einsetzenden Töne von Oboe und Fagott erkennen wir an dem sogenannten Zungenstoße und den der tiefen Blechinstrumente an dem schwerfälligen Ansatze.

Auch die Artikulation der menschlichen Stimme im Sprechen wie im Singen ist von verschiedenartigen Geräuschen begleitet, wie solche die Bildung und Aneinanderreihung der Buchstaben bedingt.

Frage 1061. Woraus geht hervor, dass alle diese, auf unregelmäßigen Luftbewegungen beruhenden Klangeigentümlichkeiten zur Erkennung des spezifischen Klanges eines Musikinstrumentes entbehrlich sind?

Antwort. Befindet sich der Beobachter in solcher Entfernung von einem Musikinstrumente (oder einem Sänger oder Redner), dass er die begleitenden Geräusche nicht mehr zu hören vermag, so kann sein geübtes Ohr trotzdem an dem Klange die Tonquelle erkennen; daraus folgt, *dass die Obertöne und das Mitschwingen des Materials die wesentlichen Faktoren der musikalischen Klangfarben bilden.*

Erkl. 986. „In der Mannigfaltigkeit der Klangfarben, in ihren Kontrasten und Mischungen beruht ein großer Teil dessen, was unser sinnliches Ergötzen an der Musik erweckt und wach erhält. Denken wir uns die schönsten Kompositionen ohne Unterschied in ein und derselben Klangfarbe ausgeführt, wir würden sicherlich mit der Zeit aller Musik überdrüssig werden. Nur durch

diese Mannigfaltigkeit des Klangkolorits sind wir imstande, musikalischen Schöpfungen einen hohen Grad charakteristischer, bis zur Objektivität gesteigerter Ausdrucksfähigkeit zu geben. In der abwechslungsreichen Anwendung und in der richtigen geschmackvollen Verwendung der dem Orchesterkomponisten zur Verfügung stehenden Instrumentalfarben beruht die Kunst einer wirksamen, das Interesse stets wach erhaltenden Instrumentierung." (Zellner.)

ε) Die Klangfarbe der menschlichen Stimme.

Frage 1062. Wie erklärt es sich, dass die Stimme eines jeden Menschen eine andere Klangfarbe hat?

Erkl. 987. Das Organ der menschlichen Stimme, sowie die Klänge derselben sind bereits im zweiten Bande des vorliegenden Lehrbuches der Akustik besprochen worden, so dass es sich hier nur um einige Ergänzungen handeln kann, welche sich den in kurzen Worten zusammengefaßten Theorien anschließen und durch entsprechende Versuche illustriert werden.

Antwort. Die Klangfarbe der menschlichen Stimme ist zunächst abhängig von dem anatomischen Baue der vielen einzelnen Bestandteile des menschlichen Stimmorganes, sodann auch von der Energie und der Art wie wir die Töne erzeugen. Der Mund bildet einen sehr wandelbaren Resonator, der bald mehr bald weniger Obertöne, bald tiefere bald höhere oder auch nur einzelne begünstigt, wodurch die Klangfarbe der menschlichen Stimme vielfachen Veränderungen unterworfen ist.

Frage 1063. Die durch unser Stimmorgan hervorgebrachten Töne zerfallen in Vokale und Konsonanten. Wodurch wird es uns leicht möglich gemacht, die Klangfarbe der menschlichen Stimme sofort von allen anderen Tonquellen unterscheiden zu können?

Erkl. 988. Tiefe kräftige Stimmen sind reicher an Obertönen, als hohe und zarte, nach dem für alle Tonquellen geltenden Gesetze, dass die Zahl und Stärke der Obertöne zu der zunehmenden Schwingungszahl und abnehmenden Amplitude des Grundtones im umge-

Antwort. Durch die Vokale wird uns solches möglich gemacht; untersucht man dieselben auf analystischem Wege, siehe S. 248 u. f. so bemerkt man im allgemeinen sechs bis acht Obertöne, die aber für die verschiedenen Vokale sehr verschiedene Intensität besitzen. Für jeden Vokal nimmt der Innenraum des Mundes eine bestimmte Form an, welcher ein b e s t i m m t e r E i g e n t o n dieses Hohlraumes entspricht, den wir dann besonders verstärkt wahrnehmen. (Siehe II. Bd. der Akustik, Seite 310 u. folgende.)

kehrten Verhältnisse steht. Töne der mittleren Lage von einer kräftigen Baßstimme in entsprechender Entfernung gesungen, lassen oft nur die Duodezime hören; der dem Gehöre entschwundene Grundton wird erst bei Verringerung der Entfernung wieder vernommen.

Frage 1064. Diese von Donders (1858) entdeckte Verstärkung eines bestimmten Obertones hat Helmholtz durch Versuche bestätigt; wie lauten die auf Grund seiner Untersuchungen aufgestellten Hauptsätze über die Vokalklänge?

Erkl. 989. Die Helmholtz'sche Theorie wurde von Anfang an von Quanten angegriffen und ist auch heute noch nicht von allen Physikern anerkannt. Dass die charakteristischen Vokale keine konstante Tonhöhe besitzen können, ergibt sich nach Emil von Quanten aus der folgenden Betrachtung: Wenn der Kehlkopf bei erhöhtem Grundtone steigt, verkürzt er die Schallröhre; wenn er bei vertieftem Grundtone sinkt, verlängert er sie. Aber das verringerte Volumen gibt einen höheren, das vergrößerte einen tieferen Eigenton. Der Eigenton der Schallröhre wechselt also in demselben Tone, wird also nicht ausschließlich von demselben Vokale bestimmt, sondern auch von dem Grundtone in der Weise, dass die Schallröhre ihren Eigenton in demselben Vokale, zu gleicher Zeit und an derselben Stelle, wie der Grundton ändert. Da unter den Obertönen des Grundtones diejenigen, welche am nächsten mit dem Eigentone der Schallröhre übereinstimmen, die stärkste Resonanz erhalten, so ergibt sich aus dem Angeführten, dass der in jedem Vokale vorherrschende Oberton oder charakteristische Ton wechselt, mit dem Grundtone, hinaufgeht, wenn letzterer steigt, und hinab, wenn dieser sinkt.

Antwort. Die Hauptsätze der Helmholtz'schen Vokallehre sind: Wie bei den musikalischen Instrumenten ist auch der Klang des Stimmorganes zusammengesetzt aus Grundton und Obertönen. Bei den Instrumenten wechselt die Klangfarbe dadurch, dass die Obertöne bald in geringerer, bald in größerer Anzahl auftreten, bald stärker, bald schwächer, bald mit periodischen Lücken. Bei allen diesen Veränderungen nehmen die Obertöne der Instrumente regelmäßig an Stärke ab, nach ihrer Ordnungsreihe aufwärts in der Skala.

Auch das Stimmorgan wechselt die Klangfarbe durch Veränderung der Anzahl der Obertöne; aber zugleich entsteht hier ein stärkeres Erklingen bald des einen, bald des anderen Obertones, ganz unabhängig von der Ordnungsfolge. Diese Verschiedenheit ist Grund des verschiedenen Charakters des Instrumental- und Vokalklanges und erklärt sich durch den Einfluß des Schall- oder Resonanzraumes auf die Klangbildung.

Sowohl das Instrument als das Stimmorgan ist versehen mit einem Schallraume, dessen Aufgabe es ist, den Klang durch Resonanz zu verstärken. Wenn die in diesem Schallraume oder Resonator befindliche Luft in Schwingung versetzt wird, gibt sie, wie Luft in jedem anderen Hohlraume, einen bestimmten Ton, dessen Höhe ab-

Wo zwei charakteristische Töne im Vokale vorhanden sind, wechseln natürlich beide auf dieselbe Weise.

Gesprochen oder gesungen auf denselben Grundton unterscheiden sich die Vokale voneinander durch die verschiedene Höhe der charakteristischen Töne in einer gewissen Ordnung. Aendert man den Grundton, so ändert man auch, mit Beibehaltung der gegenseitigen Ordnung, die charakteristischen Töne der Vokale. Der spezifische Vokallaut beruht also nicht auf einem gewissen, mehr oder weniger konstantem Verhältnisse zwischen dem charakteristischen Tone und dem Grundtone. Das allgemeine Gesetz lautet: Je tiefer der Grundton, desto tiefer, je höher der Grundton, desto höher ist der charakteristische Ton in demselben Vokale. Als Zusatz folgt, dass, wenn der Grundton auch noch so tief, oder noch so hoch wird, doch sämtliche Vokale sich auf denselben bilden lassen müssen, wenn nur die Schallröhre dem jeden Vokale eigentümlichen charakteristischen Tone, im Verhältnisse zum Grundtone, die zugehörige Resonanz zu geben vermag.

Die Erfahrung bestätigt, dass die Vokalbildung unabhängig von der absoluten Lage des Grundtones in der Skala immer am vollkommensten in der Mittellage jeder Stimme geschieht, wo die Wirksamkeit des Stimmorganes mit der größten Freiheit und Sicherheit in allen Richtungen vor sich geht, weniger vollkommen dagegen auf den Grenztönen jeder Stimme auf- und abwärts, in welchen letzteren Lagen die einzelnen Teile des Stimmorgans entweder so gespannt oder so schlaff sind, dass es im beiderseitigem Falle schwer hält, die Resonanz der Schallröhre mit gehöriger Genauigkeit und Schnelligkeit abzupassen. Auch sprechen bekanntlich alle Menschen in der Regel in der Mittellage ihrer Stimmen. Die tägliche Erfahrung lehrt, dass keiner der verschiedenen Stimmarten beim Sprechen oder Singen irgend einer der hängig ist teils von der Menge der eingeschlossenen Luft, teils von der Weite der Oeffnung des Resonators. Je größer Luftmenge und Oeffnung sind, desto höher ist der Ton. Sobald ein Ton der mit dem eigenen Tone des Schallraumes übereinstimmt, draußen angegeben wird, sei er Grundton oder Oberton in einem Klange, so wird die Luftmasse des Schallraumes sogleich in lebhafte Mitschwingung versetzt und der Ton in verstärkter Kraft vernommen.

Bei den musikalischen Instrumenten sind die Schallräume so abgepasst, dass ihr Eigenton entweder zusammenfällt mit dem Grundtone des Klanges oder ihm am nächsten entspricht, woraus folgt, dass dieser im ersteren Raume verstärkt wird und sodann die Obertöne in abnehmenden Grade, ganz wie sie in der Skala aufwärts sich entfernen.

Anders ist es mit dem Stimmorgane. Unabhängig von dem Grundtone, welcher neben seinen Obertönen durch die Schwingungen der Stimmbänder im Kehlkopfe hervorgebracht wird, kann hier der Schallraum (Schlund- oder Mundhöhle) vermöge der Beweglichkeit aller seiner Teile seinen Umfang bald vergrößern bald verringern, seine Oeffnung nach außen (den Mund) bald verengern, bald erweitern, und infolgedessen sinkt oder steigt wechselweise sein Eigenton, so dass dieser bald dem einen oder dem andern der Obertöne des Grundtones entspricht. Diese durch Resonanz verstärkten Obertöne treten aus der Klangmasse hervor und geben dieser einen eigentümlichen Charakter.

Bei dem Stimmorgane sind die stärksten Resonanzen der Schallröhre, d. h. die am stärksten schallenden Obertöne ungleich für ver-

Vokale fehlt, wie zugleich, dass alle Stimmen, der Baß, der Alt usw. dieselbe Schwierigkeit haben, die Vokale auf ihren höchsten und tiefsten Tönen hervorzubringen. Die Leichtigkeit und Schwierigkeit Vokale zu bilden, verschieben sich auf der Skala auf und ab, je nachdem die individuellen Stimmen eine tiefere oder höhere Tonlage haben. Die absolute Lage der Grundtöne übt dagegen keinen Einfluß aus. Vollkommen werden sämtliche Vokale immer auf solche Grundtöne gebildet, die zu dem Mittelumfange der Stimme gehören, weniger vollkommen auf die Grundtöne, welche auf- oder abwärts entfernt von dem Mittelumfange liegen.

schiedene Vokale, aber für denselben Vokal immer gleich. Dies erklärt, weshalb ein Vokal unter allen Umständen seine eigentümliche Klangfarbe bewahren kann. Die am stärksten schallenden Obertöne nennt Helmholtz charakteristische Vokaltöne, weil von ihnen hauptsächlich der spezifische Vokallaut abhängt.

Der Unterschied zwischen der Sprech- und Singstimme ist der, dass der Grundton den Klang beim Sprechen viel weniger beherrscht als beim Singen, dass die Grundtöne des Sprechens oft einander viel näher liegen als die des Singens und folglich größer an Zahl sind und endlich, dass das Sprechen sich meistens nur auf den Mitteltönen der Stimme bewegt, während das Singen den ganzen Tonumfang in Anspruch nimmt.

Frage 1065. Nach der Helmholtz'schen Vokallehre sind es also ein oder zwei Obertöne von ganz bestimmter absoluter Höhe im Notensysteme, welche durch die Resonanz der Mundhöhle ganz besonders stark hervortreten, und dem, mit noch anderen schwächeren Obertönen vermischten Grundtone die eigentümliche Klangfarbe der Vokale verleihen. Auf welche Weise hat Helmholtz diese Bestimmungstöne der Vokale ermittelt, und zu welchem Resultate führten seine Versuche?

Erkl. 990. Nach König, der diese Versuche sorgfältig wiederholte, würden für *U* und *J* die charakteristischen Töne *b* und *b''''* sein, so dass man folgende sehr einfache Reihe hätte:

U	O	A	E	J
b	b'	b''	b'''	b''''.

Antwort. War der Mund für die Aussprache eines Vokales geöffnet, so näherte Helmholtz ihm abwechselnd verschiedene schwingende Stimmgabeln und merkte sich die, deren Ton besonders verstärkt wurde. Er hat auf diese Weise folgende Klänge der verschiedenen Vokale gefunden:

U	O	A	Oe	Ue	Ae	E	J
f	b'	b''	cis'''	g'''	g'''	b'''	d''''
			f'	f	d''	f'	f.

Für mehrere Vokale gibt es zwei Klänge, von denen der eine dem hinteren, der andere dem vorderen Teile der Mundhöhle entspricht, die alsdann die Form eines mehr oder weniger langen Flaschenhalses annimmt.

Der Vokal *U* enthält also den Bestimmungston $f = 173$ Schw., der Vokal *O* ist charakterisiert

Diese Bestimmungen sind ziemlich schwierig, da sich die zu messenden Größen wesentlich ändern. Werden menschliche, besonders Baßstimmen zu stark angestrengt, so liegen die Obertöne *d''''* 2323 bis *g''''* 3100 Schwing. in denselben; da nun der Gehörgang gerade auf diese Töne abgestimmt ist, so wird das Ohr durch jene gegeneinander dissonierenden Töne empfindlich erregt, und hört in starken schreienden Männerchören ein unangenehmes Gerassel.

durch den Ton *b'* = 461 Schw., der Vokal *A* durch den Ton *b''* = 922 Schw., der bei dem scharfen *A* der Engländer und Italiener bis *d'''* = 1161 Schw. steigt usw.

Frage 1066. An welchem Mangel leidet die erwähnte Helmholtz'sche Methode, mit Hilfe von Stimmgabeln die Eigentöne der Mundhöhle zu ermitteln, und auf welche Weise suchte Auerbach diesem Mangel abzuhelfen?

Erkl. 991. Auerbach hat (1878) durch eingehende Versuche gefunden, dass „charakteristische Ordnungszahl" und „charakteristische Tonhöhe" gemeinsam den Vokalklang bestimmen. Erstere ist durch die Form, letztere durch das Volumen des stimmlichen Resonators und die Größe seiner Oeffnung bedingt.

Für alle Vokale ist der erste Partialton der stärkste. Der menschliche Stimmapparat schließt sich in diesem Verhalten daher eng an die künstlichen Zungeninstrumente an. Wie bei diesen, so ist auch hier das schließliche Resultat des Zusammenwirkens von Zunge und Resonanzraum dieses, dass zwar eine große Menge starker Partialtöne auftritt, der stärkste bleibt jedoch hier wie dort der Grundton.

Beim dumpfen *U* nimmt die Intensität am schnellsten ab, schon beim 7. Partialtone beträgt sie nur noch $1\frac{1}{2}$ Prozent der Gesamtstärke; beim hellen *U* und beim scharfen *O* ist die Intensität erst beim 8., bei *A* beim 11., bei *E* beim 12., und bei *I* gar erst beim 14. Partialtone auf den entsprechenden Bruchteil herabgesunken. Die Abnahme

Antwort. Der Mangel der Helmholtz'schen Methode besteht darin, dass man nicht bei allen Vokalen sich dem für die Resonanz wesentlichen Teile der Mundhöhle genügend nähern kann. Zumal in den Fällen, wo die Mundhöhle zwei selbständige Resonanzräume bildet, wird die Bestimmung des dem hinteren Teile zugehörigen Eigentones schwierig. Felix Auerbach wendet daher die folgende Methode an: Wenn man nach reichlicher Einathmung den Mund in die einem bestimmten Vokale entsprechende Stellung bringt und nun den Kehlkopf in der Gegend des Schildknorpels nach Art der Aerzte perkutiert, d. h., indem man den Mittelfinger der einen Hand fest auflegt und mit demjenigen der anderen Hand darauf klopft, so hört man einen verhältnismäßig klaren, deutlichen Ton. Seine Höhe ändert sich mit Aenderung der Mundstellung, ist aber für dieselbe Mundstellung stets die nämliche. Auf diese Weise kann man die den verschiedenen Vokalen entsprechenden Resonanztöne der Mundhöhle mit großer Genauigkeit bestimmen. Die folgende Tabelle zeigt die Eigentöne des Mundes für die verschiedenen Klänge.

U	O	A	a	ä	E	J	ö	ü
		voll	scharf					
f'	a'	f''	g'' bis b''	c'' bis d''	g' bis a'	f'	gis' bis a'	e' bis f'

erfolgt einigemale erst rasch, dann langsam, andere Male umgekehrt. Das findet in auffallendster Weise bei *A* und *J*, das letztere am stärksten bei *E* und *A* statt, während in dieser Beziehung *U* und *E* eine mittlere Stellung einnehmen.

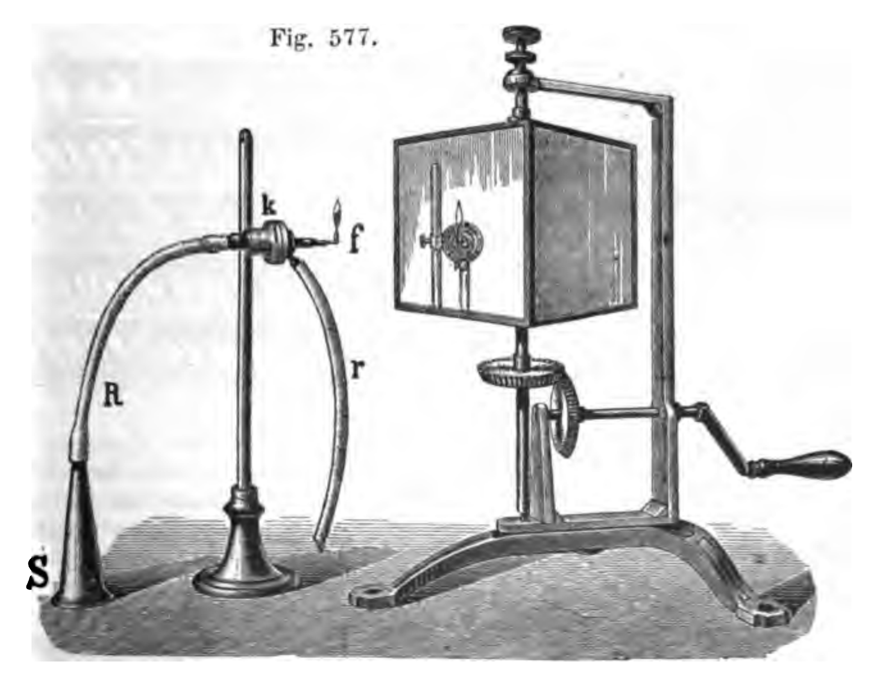
Ausnahmen der stetigen Abnahme der Intensität finden nur zwei statt; beim dumpfen *U* ist nämlich der 4. Partialton stärker als der 3., ja bei einer recht dumpfen Klangführung sogar stärker als der 2. Partialton, und beim *Ae* tritt der 5. Teilton stärker hervor.

Diese Perkussionstöne nimmt man noch bedeutend deutlicher und klarer wahr, wenn man sich die Ohren mit Klebewachs verstopft.

Frage 1067. Welches ist die vorzüglichste Methode, um die Verschiedenheiten der Vokalklänge und die der Zusammen-

Antwort. Es ist dies die von dem berühmten Akustiker Rudolf König in Paris ersonnene Me-

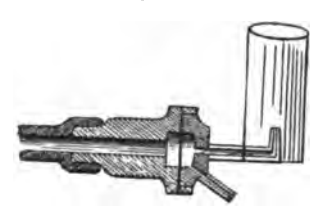
Fig. 577.



setzung ihrer charakteristischen Eigentöne entsprechenden Schwingungsformen zur Anschauung zu bringen?

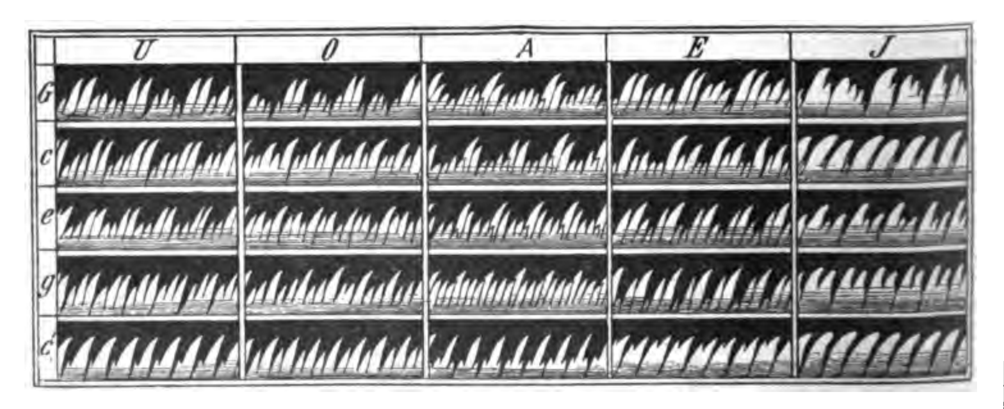
Erkl. 992. Statt des Mundstücks S in Fig. 577 kann auch ein auf c abgestimmter Resonator vorhanden sein, vor welchem eine Stimmgabel den reinen einfachen Ton c erzeugt; dieser Ton

Fig. 578.



pflanzt sich dann durch die Röhre nach der Membran der Flammenkapsel fort und erregt soviele Zuckungen der Flamme, als der Ton Schwingungen enthält; die Flammenbilder der Töne geben uns also auch die Schwingungszahlen der Töne und die Verhältnisse der Intervalle zu erkennen; so entstehen durch den Ton g', der dreimal so viel Schwingungen als c enthält, für jeden Zacken des letzteren Tones deren drei, wie Fig. 580 angibt. Werden mittelst der Röhre R (Fig. 577) die zwei Töne c und g' zugleich in die Flammenkapsel geleitet, so teilt sich jede breite Zuckung des c noch

Fig. 579.



thode der Flammenanalyse, welche es möglich macht, alle Partialtöne eines Klanges gleichzeitig zu sehen. Die dazu notwendige Vorrichtung, welche wir schon im ersten Bande der Akustik (Seite 113) kennen lernten, besteht im wesentlichen in der geteilten Kapsel k (Fig. 578), deren Teile durch eine feine Membran voneinander getrennt sind. In den vorderen Teil tritt Leuchtgas ein, das einem Brenner mit sehr kleiner runder Oeffnung zugeleitet und da entzündet wird. Es ist zweckmäßig, die Flamme durch einen Glaszylinder z gegen den Luftzug zu schützen, welchen die Drehungen des kubischen Spiegels erzeugen. In die hintere Hälfte der Kapsel k mündet ein Kautschukschlauch R, welcher in ein Mundstück S ausläuft, in das man sprechen oder singen kann, wodurch bestimmte Impulse auf die Membrane ausgeübt werden, die sich von dieser auf das Gas, und von hier auf die Flamme fortpflanzen, um das dem betreffenden Tone oder Vokale oder der Verbindung beider entsprechende, vom rotierenden Spiegel wiedergegebene Flammenbild hervorzurufen. Singen wir in das Mundstück die fünf Hauptvokale der Reihe nach

in drei feinere des g'; die entstehenden Flammenbilder erscheinen dann in den verschiedenen Formen der Fig. 581, je


Fig. 580.



Fig. 581.

nach der Intensität der Einzeltöne, welche leicht erkennen lassen, dass sie von einem Grundtone in Verbindung mit seinem zweiten Obertone herrühren. Aus Fig. 579 ist leicht zu ersehen, dass den Flammenbildern eines und desselben Tones für die verschiedenen Vokale die geometrische Aehnlichkeit fehlt, woraus der Helmholtz'sche Satz ersichtlich ist, dass ein Vokal nicht durch Mischung eines Grundtones mit einer und derselben Zahl seiner Obertöne entsteht.

auf die Töne *G*, *c*, *e*, *g*, *e'*, so erhalten wir (nach Königs Aufzeichnungen) die in Fig. 579 dargestellten Flammenbilder, welche so charakteristisch sind, dass man aus ihnen sowohl den gesprochenen Vokal, sowie die Tonhöhe des gesungenen auf das bestimmteste erkennen kann.

Frage 1068. Wie lauten die Hauptsätze der Graßmann'schen Vokaltheorie?

Erkl. 993. Zu der nebenstehenden Theorie bemerkt Auerbach (Wiedemanns Annalen, IV. Band 1878) folgendes: „Inbezug auf den Einfluß der Tonhöhe des Grundtones der Vokalklänge auf die Partialtöne zerfallen nach Graßmann sämtliche Vokale in zwei Klassen. Bei den Vokalen *u-ü-i* ist der charakteristische Oberton (d. h. nach Graßmann der einzige vorhandene, richtiger aber der stärkste) durch seine absolute Tonhöhe bestimmt und unabhängig von der Tonhöhe des Grundtones. Dagegen beim *o-ö-e* und in besonderem Grade beim *a* ist die Lage des Gebietes der Obertöne abhängig von der Tonhöhe des Grundtones, auf welchen man den Vokal angibt. Einen derartigen diametralen Gegensatz in zwei

Antwort. Graßmanns Theorie läßt sich in folgende Sätze zusammenfassen: 1) Die Vokalklänge der Reihe *u-ü-i* sind charakterisiert durch das Mitklingen eines einzigen Obertones und dieser reicht für *u* von *c* bis *c'''*, für *ü* von *c'''* bis etwa *e''''*, für *i* von da bis zu beliebiger Höhe. Ist der betreffende Oberton tiefer, so entsteht ein dunkleres *u-ü-i*, ist er höher, so ensteht ein helleres *u-ü-i*; immer aber bleibt der Vokalcharakter an eine bestimmte Höhe des Obertones gebunden. Hiernach ist das *u* mit dem Obertone *c* das tiefste was im Bereiche der menschlichen Stimme vorkommt, dagegen ein *u* mit dem Obertone *c'''* wäre das höchste, und wenn der Oberton über *c'''* hinaussteigt, so entsteht ein *ü*. (S. II. Bd. der Akustik, S. 317.)

Wirkungsgebieten desselben Organes kann ich nicht anerkennen."

Dazu äußert sich J. Lahr (Wiedemanns Annalen Bd. 27) folgendermaßen: „Wenn Graßmann sagt, die Vokale der Reihe *u-ü-i* sind charakterisiert durch das Mitklingen eines Obertones, und dieser Oberton kann für den Vokal *u* z. B. innerhalb dreier Oktaven ein jeder Ton sein, so ist damit gewiß nicht gesagt, dass der Vokal *u* überhaupt nur e i n e n charakteristischen Ton besitzt. Auf der anderen Seite aber versteht es sich nach dem Begriffe der Obertöne von selbst, dass der jeweilige charakteristische Ton nicht unabhängig von der Tonhöhe des Grundtons sein kann, denn singe ich z. B. *u* auf den Ton *c*, so kann *c*'' charakteristischer Ton für *u* sein; er kann es auch noch sein, wenn ich *u* auf *c*' singe. Singe ich dagegen *u* auf die Töne *e*', *g*' usw., so kann *c*'' nicht mehr charakteristischer Ton sein, weil er dann nicht mehr Oberton sein kann. Es ist daher eine irrige Auffassung der Graßmann'schen Theorie, wenn Auerbach sagt, *u* besitzt nur einen charakteristischen Ton von absoluter Höhe. Ganz in derselben Weise, wie der charakteristische Ton des *u-ü-i*, sind auch die Obertöne des *o-ö-e* von der Tonhöhe des Grundtones abhängig. Außerdem hängen dieselben auch noch ab von der Lage des charakteristischen Tones von *u-ü-i*; denn ändert sich der charakteristische Ton des *u-ü-i*, so müssen sich mit demselben auch die charakteristischen Töne dieser Vokale ändern."

2) Der Vokalklang *a* ist charakterisiert durch das Zusammenklingen der ersten acht Partialtöne in fast gleicher Stärke. Auf *c* gesungen klingen die Töne *c*', *g*', *c*'', *e*'', *g*''', *c*''' mit.

3) Jeden Vokalklang der Reihe *o-ö-e* kann man sich aus dem *a*-Klange und einem Klange der Reihe *u-ü-i* zusammengesetzt denken, wie z. B. *o a-u*, *ö a-ü*, *e a-i*, d. h. die Obertöne von *o* liegen von dem charakteristischen Tone des *u*, also von *c*' halb so weit entfernt, als die Obertöne von *a*. Ist z. B. *c* der Grundton, so enthält *a* die Obertöne von *c*' bis *c*''', also *o* die Obertöne von *c*' bis *c*''. Aehnlich kann man den Vokal *ö* als in der Mitte zwischen *ü* und *a* liegend annehmen und *e* als in der Mitte zwischen *i* und *a* liegend.

Frage 1069. Welche Einwände erhob Auerbach, der die Helmholtz'sche Theorie verteidigte, gegen die vorstehende Graßmann'sche Theorie?

Erkl. 994. Man hört Obertöne desto leichter, je verschiedener ihr Charakter von demjenigen des Grundtones ist; z. B. den ersten und den dritten Oberton (erste und 2. Oktave des Grundtones) hört man schlechter als den zweiten

Antwort. Auerbach bemerkt: „Wenn ich auf *c* der Reihe nach die verschiedenen Nuancen des *u-ü-i* singe, so höre ich nicht nur einen einzigen, höher und höher hinaufsteigenden Oberton, sondern eine ganze Anzahl, deren stärkster aufsteigt. (Siehe Erkl. 994.) Ich kann das auf den Ton *c* gesungene *u* so dumpf als möglich wählen, die Obertöne *g*', *c*'', *e*'' höre ich

(die Quinte der Oktave des Grundtones). Im allgemeinen kann man sagen: Ein Oberton markiert sich desto schärfer, je größer die größte der Primzahlen ist, in welche man seine Schwingungszahl zerlegen kann, diejenige des Grundtones gleich 1 gesetzt. Dieser Einfluß ist aber nicht sehr beträchtlich und nimmt bei andauernder Uebung rasch ab.

Man darf die Vokale nicht sehr laut, sondern muß sie so leise wie möglich singen, denn nur in letzterem Falle ist der Klang unabhängig von der Intensität.

doch stets neben dem *c'*, und ebenso höre ich bei *i* und *ü* neben den hohen Obertönen auch tiefe.

Die umgekehrte Aenderung möchte ich zu dem Satze 2) vorschlagen. Freilich tritt hier kein Partialton so entschieden als der stärkste hervor, wie bei der Reihe *u-ü-i*, das ist das Charakteristikum eines „hellen'' oder „breiten'' Vokals. Aber ein Zweifel, dass ein Partialton, und welcher der stärkste sei, tritt auch hier niemals ein.

Frage 1070. Welches sind die wichtigsten Resultate der Auerbach'schen Untersuchung?

Erkl. 995. „Was unterscheidet denn die menschliche Stimme von den künstlichen musikalischen Instrumenten? Bei diesen letzteren ist der Klang gegeben und unveränderlich, die Tonhöhe veränderlich und die Erfahrung zeigt, dass für den Klang einzig und allein die relative Tonhöhe der Obertöne maßgebend ist, d. h. die Intervalle, welche sie mit dem Grundtone bilden. Weit verwickelter sind die Verhältnisse der menschlichen Stimme, weil hier Tonhöhe und Klang veränderlich sind. — Der menschliche Stimmapparat besitzt ein ausgedehntes Anpassungsvermögen, welches bei *a* am größten, bei *u* und *i* am kleinsten gedacht werden muß. Singt man z. B. das *u* eine Oktave höher, als man es kurz zuvor gesungen hatte, so rücken auch sämtliche Obertöne eine Oktave hinauf; aber sie behalten nicht die frühere Intensität. Denn beim *U* ist die Mundhöhle ein nahezu abgeschlossener Raum; das Gebiet der Resonanztöne, welche sie hervorzubringen und mit einer gewissen Stärke zu erhalten imstande ist, ist daher beschränkt; bei jenem Uebergange von einem Grundtone zu seiner Oktave werden daher gewisse Obertöne, die vorhin an der Grenze jenes Gebietes lagen, in dasselbe

Antwort. 1) Alle Klänge, insbesondere die Vokale der menschlichen Stimme und Sprache, sind zu definieren als die Folge des Zusammenwirkens zweier Momente, eines relativen und eines absoluten.

2) Das relative Moment ist die Art der Verteilung der Gesamtintensität auf die einzelnen Partialtöne, wie sie durch ihre Ordnungszahlen bestimmt sind. Das absolute ist die Abhängigkeit der Gesamtintensität von der absoluten Tonhöhe der Partialtöne und die damit verbundene Modifikation der Verteilung bei Aenderung des Grundtones.

3) Die Verschiedenheit der Vokale in der ersten Hinsicht ist eine Folge der Fähigkeit der Mundhöhle, ihre Form zu ändern. Die Unterschiede der den verschiedenen Vokalen charakteristischen absoluten Tonhöhen und des Einflusses derselben sind eine Folge der Fähigkeit der Mundhöhle, ihr Volumen und die Größe ihrer Oeffnung zu ändern.

4) Der erste Partialton ist stets der stärkste im Klange; er verdient daher den Namen „Grundton''.

5) Die Intensität der Partialtöne als solcher nimmt im allgemeinen ab, wenn ihre Ordnungs-

hineinrücken, andere aus dem Innern an die Grenze gedrängt werden; erstere werden jetzt stärker, letztere schwächer als vorhin erklingen. Keineswegs aber wird der stärkste Ton seinen absoluten Ort innebehalten. Dann könnte z. B. eine Frauenstimme ein dumpfes *u* nicht hervorbringen." (Auerbach.)

Erkl. 996. Die Versuche von Schneebeli bestätigen die Graßmann'sche Theorie. Schneebeli zeichnete mit seinem Phonautographen die Schwingungskurven für *o* auf, wenn dieser Vokal in der Tonhöhe *e'*, *g'*, *c''* und *e''* ausgesprochen wird und zerlegte dieselben in einfache Sinuslinien. Aus der Länge ihrer Ordinaten schloß er auf die relative Intensität der ersten 6 Obertöne und fand auf diese Weise, dass die Klangfarbe des Lautes *o* nicht durch eine Verstärkung eines bestimmten Tones charakterisiert ist, der stets derselbe bleibt, wie sich auch der Grundton ändert, sondern durch das beständige Vorherrschen der Oktave.

zahl zunimmt; Ausnahmen deuten auf die Nähe der Grenze des Konsonantengebietes.

6) Die Intensität der Partialtöne nimmt desto langsamer ab, je heller, desto schneller, je dumpfer der Vokalklang ist.

7) Die charakteristische Tonhöhe liegt desto höher, je heller, desto tiefer, je dumpfer der Vokalklang ist.

8) Die Schwingungen der Intensität infolge des Einflusses der charakteristischen Tonhöhe sind desto größer, je voller der Vokal ist. Sehr geringe Schwankungen deuten die Nähe der Grenze des Konsonantengebietes an.

9) Sämtliche Vokale lassen sich in dem gesamten Umfange der menschlichen Stimme singen; aber die dumpfen sprechen in sehr hohen, die hellen in sehr tiefen Lagen schlecht an.

10) Es gehört nur einige Aufmerksamkeit dazu, um in einem Vokalklange die verhältnismäßig oft sehr starken Obertöne auch ohne künstliche Hilfsmittel einzeln wahrzunehmen. Sie klingen dann den reinen Stimmgabeltönen sehr ähnlich.

Frage 1071. Auf welche Weise suchte J. Lahr durch Stimmgabelversuche festzustellen, ob die Helmholtz'sche oder die Graßmann'sche Theorie die richtigere ist?

Erkl. 997. Mit der Erfindung des Phonautographen und Phonographen sind uns Apparate an die Hand gegeben, mittelst welcher wir die von der menschlichen Stimme erzeugten Töne direkt untersuchen können. Zunächst suchte man die Frage zu beantworten, ob die Höhe des charakteristischen Tones unabhängig von der Tonhöhe des Grundtones sei (wie v. Helmholtz behauptet), oder ob der charakteristische

Antwort. Zunächst suchte Lahr durch Stimmgabelversuche festzustellen, ob die Tonhöhe stärkster Resonanz der Mundhöhle für jeden Vokal eine feste ist, wie v. Helmholtz lehrt, oder ob dieselbe für einen und denselben Vokal eine verschiedene ist, was mehr der Graßmann'schen Theorie entsprechen würde. Hat man zwei auf *b'* und *b''* abgestimmte Gabeln zur Hand und bringt die erstere angeschlagen vor die Mundöffnung, während man die Mundteile in die Stellung bringt, als wolle man *u* auf einen Ton singen (z. B. auf *b*) der zu dem betreffenden

Ton „Oberton" sei, während die Graßmann'sche Theorie unberücksichtigt blieb.

Ueber seine Versuche mit dem Phonautographen sagt Graham Bell (1879): „Wenn die Helmholtz'sche Theorie richtig wäre, würden die Vokale keine periodischen Kurven hinterlassen, wenn sie auf einen Ton gesungen würden, welcher zu dem charakteristischen Tone nicht Grundton ist. Dagegen würden, wenn die Lehre von der relativen Tonhöhe des charakteristischen Tones richtig wäre, die Kurven immer periodische Kurven sein müssen, und der vorherrschende Partialton, der immer in bestimmtem Verhältnisse zum Grundton inbezug auf Höhe und Stärke steht, würde für jeden Vokal eine bestimmte Form der Kurve hervorbringen, welche für dieselben Vokale bei verschiedener Höhe konstant sein würde. Die von mir und W. Blake gezogenen Vokalkurven waren periodische Kurven und scheinen die genannten Schlüsse zu bestätigen, wenn auch die Schwingungsform bei verschiedener Höhe nicht immer dieselbe ist."

Vergleichen wir diese Ausführungen Bells und seine Versuchsresultate mit der Graßmann'schen Theorie, so finden wir nicht allein eine Bestätigung dafür, dass die charakteristischen Töne Obertöne sein müssen, sondern wir finden in der Graßmann'schen Theorie auch die Erklärung für die verschiedenen Schwingungsformen bei einem und demselben Vokale in verschiedener Tonhöhe.

Während durch die Versuche mit dem Phonautographen die Lehre von der relativen Tonhöhe des charakteristischen Tones bestätigt wird, findet man eine Bestätigung der entgegengesetzten Ansicht durch die Versuche mit dem Phonographen. Spricht oder singt man nämlich einen Vokal in den Schallbecher des Phonographen, während die Walze desselben mit bestimmter Geschwindigkeit gedreht wird, so wird derselbe Vokal von dem Apparate re-

Stimmgabeltone Grundton ist, so nimmt man eine bedeutende Verstärkung des Stimmgabeltones wahr; führt man dann die Mundteile plötzlich in die *o*-Mundstellung über, während man die Gabel unverändert in derselben Lage läßt, so ist man im Zweifel, bei welcher Mundstellung die Gabel am stärksten ertönt. Fast ebenso ist das Verhältnis, wenn man die *b''*-Gabel angeschlagen vor die Mundöffnung bringt, während die Mundteile in der Stellung sich befinden, als wolle man *u* auf den Ton *b'* singen und dann dieselben in die *ao*-oder *o*-Stellung ebenfalls wieder plötzlich überführt. Aehnlich waren die Versuche mit Stimmgabeln von anderer Tonhöhe. Dagegen vernimmt man nur schwache Resonanz, wenn man die Versuche in gleicher Weise in bezug auf die Vokale *a-e-i* anstellt. Diese Versuche sprechen für die Graßmann'sche Theorie.

Bei den synthetischen Stimmgabelversuchen verfährt Lahr nach der Graßmann'schen Angabe, indem er die einzelnen Vokale dadurch darzustellen suchte, dass er einen oder mehrere Obertöne mit dem Grundtone zusammen erklingen ließ. Zwei auf *c* und *c'* abgestimmte Gabeln auf Resonanzkästen wurden mit dem Violinbogen gleich stark angestrichen und gaben ein *o*-ähnliches *u*, welches in ein schönes reines *u* überging, je mehr einer dieser beiden Töne neben dem andern verschwindet. Läßt man statt des ersten den 2., 3. usw. Oberton mit dem Grundtone zusammen erklingen, so nimmt der Vokalcharakter eine immer hellere Färbung an und geht schließlich (ganz nach Graßmanns Angaben) in *Ue* über. Um ein schönes *ü* zu erhalten, muß der hohe Oberton in mindestens gleicher Stärke neben dem Grundtone erklingen; *i* erhält man, wenn man

produziert, wenn dabei die Umdrehungsgeschwindigkeit dieselbe ist. Wäre nun die Lehre von der relativen Tonhöhe richtig, so dürfte sich der Vokalcharakter auch dann nicht ändern, wenn bei der Reproduktion die Umdrehungsgeschwindigkeit eine andere wäre als diejenige, bei welcher man den Vokal in den Apparat gerufen hat. Der Vokalcharakter ändert sich aber, wenn man bei der Reproduktion die Walze mit beschleunigter oder verminderter Geschwindigkeit dreht, woraus man schloss, dass die Lehre von der absoluten Tonhöhe des charakteristischen Tones richtig sei.

den Grundton nur schwach, dagegen einen hohen Oberton sehr stark erklingen läßt. Hierdurch ist festgestellt, dass die genannten Vokale hauptsächlich durch das Mitklingen nur eines Obertones charakterisiert sind, denn läßt man zum gleich stark klingenden Grund- und ersten Obertone, noch einen zweiten hinzutreten, so vernimmt man sofort eine Aenderung des Klanges, der sich am deutlichsten als *o* markiert, wenn man plötzlich einen oder noch besser beide Obertöne zum Schweigen bringt. Der plötzliche Uebergang von einem zum anderen Klange läßt deutlich die Vokale *o* und *u* erkennen. Schöner und voller klingt das o, wenn man außer den beiden genannten, noch den 3. Oberton mitklingen läßt (z. B. c, c', g', c''). Man vernimmt auch in diesem Falle sofort eine Veränderung des Klanges, wenn man noch weitere Partialtöne hinzutreten läßt. Aus diesen Versuchen geht hervor, dass es nicht ein Ton von bestimmter Höhe ist, der einem Vokale seinen Charakter verleiht, sondern, dass hauptsächlich die verschiedene Anzahl und Lage der verstärkten Obertöne die Vokale unterscheidet.

Frage 1072. Zu welchen Resultaten gelangte Lahr bei seinen Versuchen, welche er zur Prüfung der Graßmann'schen Theorie mit Hilfe des Phonographen ausführte?

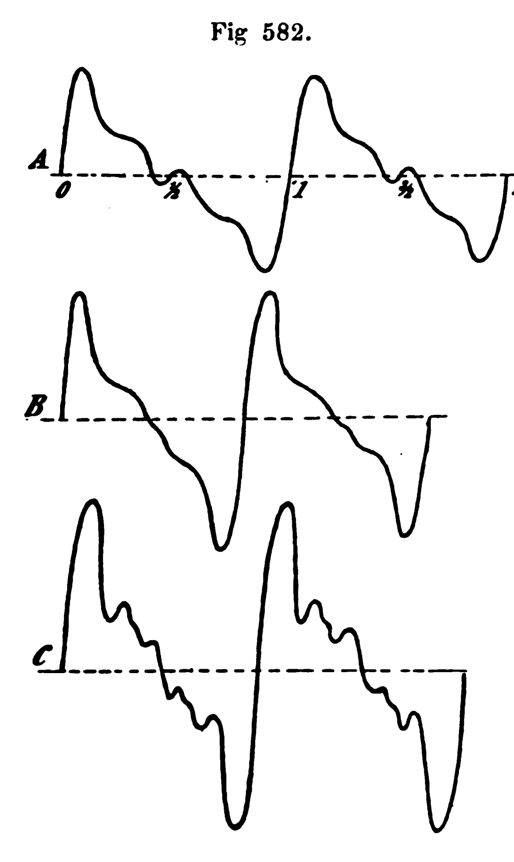
Erkl. 998. Wir erhalten Figuren für die verschiedenen Vokalklänge sowohl durch die manometrische Flammenkapsel als auch durch den Schreibstift des Phonautographen, welche in ihren charakteristischen Formen eine nicht zu

Antwort. 1) *u* in den Schallbecher des Phonographen gerufen, während die Walze mit mäßiger Geschwindigkeit gedreht wird, wird als derselbe Vokal reproduziert bei derselben und verminderter Umdrehungsgeschwindigkeit. Ist die Umdrehungsgeschwindigkeit eine größere, so wird ein *ü* und bei noch schnellerer Umdrehung ein *i* gehört. Letzterer Ton entspricht jedoch mehr einem schrillen Pfeifenton.

2) *ü* in den Apparat gerufen, wird als derselbe Vokal reprodu-

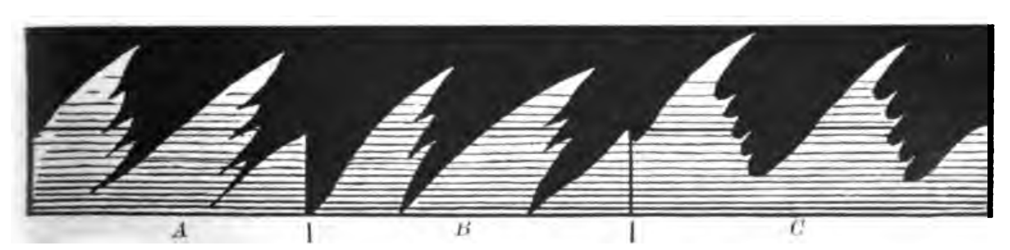
verkennende Aehnlichkeit zeigen, wie aus den Figuren 582 und 583 ersichtlich ist, welche unter *A* das Kurven- resp. Flammenbild eines dumpfen *U*, unter

Fig 582.



B dasjenige eines scharfen *O* in der mittleren Baritonlage, und unter *C* das eines hellen *A* in der mittleren Bariton-

Fig. 583.



lage darbieten. Wird der Boden einer Flammenkapsel von der Platte eines Telephons gebildet, so nimmt die Flamme

ziert, wenn die Umdrehungsgeschwindigkeit dieselbe wie beim Hineinsprechen ist. Man hört jedoch ein *u* bei verminderter und ein *i* bei beschleunigter Umdrehung.

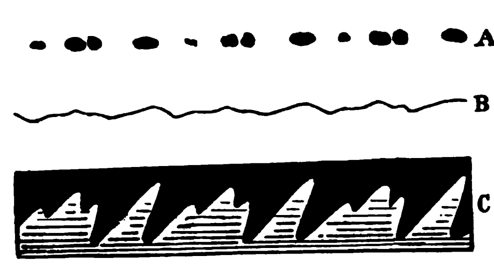
3) *o* in den Phonographen gerufen, wird als *o* deutlich wiedererkannt bei gleicher und verminderter Umdrehungsgeschwindigkeit. Gerade bei letzterer ergab sich ein schönes dunkles *o*. Der Vokalcharakter wurde dagegen geändert ,das heißt es wurde ein *ö* gehört bei beschleunigter Umdrehung und ein *e* bei noch größerer Umdrehungsgeschwindigkeit.

4) *a* in den Schallbecher des Phonographen gerufen, behält seinen Charakter bei der Reproduktion, wenn die Umdrehungsgeschwindigkeit dieselbe ist oder vergrößert wird. Man hört jedoch bei verminderter Geschwindigkeit ein ao. Beachtet man nun, daß die durch beide Apparate gewonnenen Resultate die Graßmann'sche Theorie bestätigen, während sie sich in bezug auf die beiden anderen Theorien direkt widersprechen, so dürfte das allein schon als hinreichender Beweis für die Richtigkeit der Graßmann'schen Theorie betrachtet werden.

Aber auch andere eingehendere Versuche, die mit dem Phonautographen von Schneebeli in Zürich und mit dem Phonographen von Jenkin und Ewing in Edinburgh, sowie von Lahr angestellt wurden, bestätigen dieselbe.

ähnliche aber etwas verwickeltere Gestalten an. Die Aehnlichkeit findet sich auch bei den phonographischen Aufzeichnungen, wie die Figur 584 zeigt, in der A. Mayer bei *A* die Eindrücke darstellt, die ein Vokal auf der Walze des Phonographen hervorbringt, *B* zeigt den Querschnitt derselben und *C* das Profil der manometrischen Flamme für denselben Vokal.

Fig. 584.



Lahr faßt die Ergebnisse seiner Untersuchungen dahin zusammen, dass es nicht ein Ton von absoluter, auch nicht von relativer Höhe ist, der den Charakter eines Vokals bestimmt, sondern dass die Vokale charakterisiert sind:

1) Durch die Anzahl, 2) durch die Intensität und 3) durch die Lage der verstärkten Obertöne in bezug auf den Grundton.

Da aber das Verhältnis dieser drei charakteristischen Vokaleigenschaften zueinander nicht nur bei den verschiedenen, sondern bei demselben Vokale sehr verschieden ist, so läßt sich eine bestimmte Definition für die einzelnen Vokale auch nicht geben, sondern man muß mit Graßmann sagen: „Die Vokale können ebensowie die Farben nur durch Verteilung auf einer ganzen Fläche vollständig dargestellt werden.“

B. Der Zusammenklang.

a) Die Interferenz des Schalles.

α) Allgemeines.

Frage 1073. Was verstehen wir unter Interferenz?

Antwort. Mit dem Worte Interferenz bezeichnen wir ein vollständiges oder teilweises Ausgleichen der in einem Körper durch Wellenbewegungen hervorgerufenen Veränderungen, sobald verschiedene Wellensysteme sich durchkreuzen.

Frage 1074. Welches Interferenzgesetz wurde bereits im ersten Bande des vorliegenden Lehrbuches der Akustik (Seite 49) inbezug auf die Wasserwellen ausgesprochen?

Antwort. Wenn die Ausgangspunkte zweier gleich langen Wellen von gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Fortpflanzungsrichtung um eine gerade Anzahl von

Erkl. 999. In Fig. 524, S. 211, A, B und C ist bereits graphisch dargestellt, wie aus zwei gleichen und gleichzeitig aufeinander wirkenden Tonkurven eine neue Kurve mit doppelt so hohen Bergen und doppelt so tiefen Tälern entsteht. Denkt man sich dagegen die Schwingungen der zweiten Tonquelle um eine halbe Schwingungsdauer verschoben, so kommen die zu addierenden Schwingungen wie die Kurven D und E (Fig. 524) untereinander zu stehen, und ihre Summe wird bei gleicher Intensität gleich Null sein.

halben Wellenlängen voneinander entfernt sind, so verstärken die Wellen einander; sind aber die Ausgangspunkte um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen voneinander entfernt, so schwächen die Wellen einander und heben bei gleichen Amplituden einander auf.

Frage 1075. Wie lautet dasselbe Gesetz auf Töne übertragen?

Antwort. W e n n s i c h z w e i T ö n e, d i e v o n g l e i c h e r H ö h e s i n d, n a c h g l e i c h e r R i c h t u n g f o r t p f l a n z e n, u n d d e r e n E r r e g u n g s s t e l l e n u m e i n e g e r a d e A n z a h l v o n h a l b e n W e l l e n l ä n g e n v o n e i n a n d e r a b s t e h e n, s o f a l l e n s o w o h l i h r e V e r d i c h t u n g s- w i e a u c h i h r e V e r d ü n n u n g s w e l l e n, sich g e g e n s e i t i g v e r s t ä r k e n d, a u f e i n a n d e r, u n d d e r T o n w i r d s t ä r k e r.

S i n d a b e r d i e E r r e g u n g s s t e l l e n g l e i c h h o h e r T ö n e u m e i n e u n g e r a d e A n z a h l h a l b e r W e l l e n l ä n g e n v o n e i n a n d e r e n t f e r n t, d a n n f ä l l t i m m e r e i n e V e r d i c h t u n g s w e l l e d e s e i n e n T o n e s m i t e i n e r V e r d ü n n u n g s w e l l e d e s a n d e r n z u s a m m e n u n d d i e b e i d e n T ö n e s c h w ä c h e n s i c h e i n a n d e r, j a, s i e h e b e n b e i g l e i c h e r S t ä r k e e i n a n d e r a u f.

Erkl. 1000. Alle Vibrationsbewegungen, wie die des Lichtes oder des Schalles, sind der Interferenz unterworfen, d. h. sie können zusammenwirken oder sich entgegenwirken. Da jede Vibration in einem Hin- und Hergange besteht, so kann ein Impuls, der von einer Licht- oder Schallquelle ausgeht, einem andern, der von einer zweiten Quelle kommt, gerade entgegengesetzt sein, wodurch das, den beiden Kraftwirkungen ausgesetzte Aether- oder Luftteilchen nach zwei entgegengesetzten Richtungen gezogen wird und deshalb in Ruhe bleibt, wenn beide Impulse gleich stark waren. Zwei Töne können sich daher zum Schweigen bringen, zwei Lichtstrahlen sich auslöschen und Dunkelheit erzeugen.

Frage 1076. Zu welchen Ergebnissen haben die Untersuchungen von E. Mach über die Interferenz der Schallwellen von großer Schwingungsweite geführt?

Antwort. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle ist um so größer, je größer die Schwingungsweite der Welle ist;

Erkl. 1001. Derartige Wellen von großer Schwingungsweite wurden durch die Entzündung von Explosivstoffen oder durch den Entladungsfunken einer Leydener Flasche erhalten. Sie wurden vermittelst der Eindrücke untersucht, welche sie in dünn auf Metallscheiben aufgetragenen Rußschichten hervorbrachten. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ergab sich entweder aus der Lagenänderung der von zwei Wellen mit bekanntem Gangunterschiede hervorgerufenen Marken, welche eintrat, wenn die berußte Scheibe mit genau bestimmbarer Geschwindigkeit rotierte, oder aus der Verschiebung, welche der von den beiden Wellen in die Rußschicht eingezeichnete Interferenzstreifen durch die Rotation der Platte erfuhr.

sie wird um so kleiner, je weiter sich die Welle von ihrer Ursprungsstelle entfernt, bis sie zuletzt in die gewöhnliche Schallgeschwindigkeit übergeht. Die Ueberdeckungsstelle zweier interferierenden Wellen besitzt eine größere Fortpflanzungsgeschwindigkeit, als die beiden primären Wellen; sie kann als eine sekundäre Welle aufgefaßt werden, welche die primären Wellen überholt.

Frage 1077. Auf welche Weise gelangen wir zur Kenntnis der Wellensysteme, welche sich von zwei gleichen, in derselben Phase befindlichen Schwingungszentren ausbreiten?

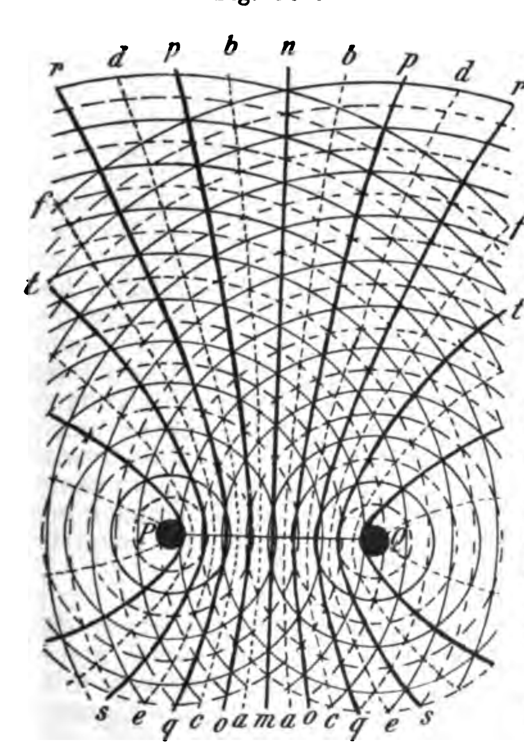
Erkl. 1002. Das griechische Wort H y p e r b e l bezeichnet in der Geometrie eine Kurve, einen Kegelschnitt, welcher dadurch entsteht, dass eine Ebene einen Doppelkegel schneidet. Diese Kurve besteht daher aus zwei getrennten Teilen, welche mit vier Aesten in das Unendliche ausläuft. Dieselbe entsteht z. B., wenn man einen Kegel durch eine Ebene parallel seiner Achse schneidet.

Die in Figur 585 gezeichneten Hyperbeln op, qr, st, ab, cd, ef beschreiben bei ihrer Rotation um die Gerade PQ eine Reihe gekrümmter Flächen, sogenannte H y p e r b o l o i d e, auf denen die Dichtigkeit die größte bezw. kleinste periodische Aenderung erfährt. Hyperboloide sind im allgemeinen Rotationskörper, welche durch Drehung einer Hyperbel um ihre Achse im Raume beschrieben werden.

Antwort. Es seien P und Q (Fig. 585) zwei Tonquellen, von denen aus sich zwei Wellensysteme mit gleicher Geschwindigkeit, gleicher Schwingungszeit und gleicher Schwingungsphase in longitudinalen Wellen ausbreiten, so haben wir uns eine Reihe von Kugeloberflächen mit dem Mittelpunkte P und Q vorzustellen, deren aufeinander folgende Radien sich um eine halbe Wellenlänge unterscheiden, und auf denen die Dichtigkeit abwechselnd am größten oder kleinsten ist. Die nebenstehende Figur zeigt den Durchschnitt der Kugeloberfläche mit einer durch P und Q gehendenEbene. Nehmen wir an, dass die ausgezogenen Kreise die Durchschnitte von Wellenbergen oder solchen Kugeloberflächen sind, auf denen die Luftverdichtung in dem betreffenden Augenblicke am größten ist, und dass die gestrichelten Kreise die Punkte größter Luftverdünnung oder Wellentäler andeuten. Da, wo zwei durchgezogene Kreise einander treffen, wird

Auf den ausgezogenen Hyperboloidenschnitten *op*, *qr*, *st*, sowie auf der durch *mn* gehenden Ebene, wird das Ohr den stärksten Ton wahrnehmen, während auf den gestrichelten Hyperboloiden, *ab*, *cd*, *ef*, der Ton am meisten geschwächt wird.

Fig. 585.



die Verdichtung durch das Zusammenwirken der Schwingungen verstärkt; und ebenso ist dies der Fall mit der Verdünnung in den Schnittpunkten der gestrichelten Kreise. Die Punkte deren Abstände von P und Q einander gleich sind, und in denen also die Schwingungen verstärkt werden, liegen auf der Geraden $m\,n$, welche senkrecht auf der Verbindungslinie PQ steht und durch ihren Mittelpunkt geht. Alle diejenigen Punkte, für welche die Differenz der Abstände von P und Q konstant ist, liegen auf einer Hyperbel (siehe Erkl. 1002), deren Achse die Verbindungslinie von P und Q ist; so kreuzen sich in den Linien $o\,p$ Wellenberge, resp. Wellentäler, die um zwei halbe Wellenlängen von dem einen Mittelpunkte weiter entfernt sind, als von dem andern; ebenso differieren die in den Linien $q\,r$ sich treffenden Wellenberge, resp. Täler, um 4, die der folgenden Hyperbel $s\,t$ um 6 halbe Wellenlängen.

Zwischen diesen Linien verlaufen solche, wie z. B. die Linien $a\,b$, $c\,d$, $e\,f$, in deren Punkten je ein Wellenberg mit einem Wellentale von gleicher Höhe und Tiefe interferieren, in denen also die Dichtigkeit fast gar keine Veränderung erleidet, und welche von dem einen Mittelpunkte um 1, 3, 5 halbe Wellenlängen weiter abstehen, als von dem andern.

Allgemein: Befinden sich die beiden Schwingungszentren in derselben Phase, so beträgt für die Punkte, in denen der größte Wechsel der Dichtigkeit stattfindet, der Unterschied der beiden Abstände von P und Q eine gerade Anzahl halber Wellenlängen; für die Punkte, in denen der Wechsel in der

Dichtigkeit am geringsten ist, beträgt der Unterschied der Abstände von P und Q eine ungerade Anzahl halber Wellenlängen.

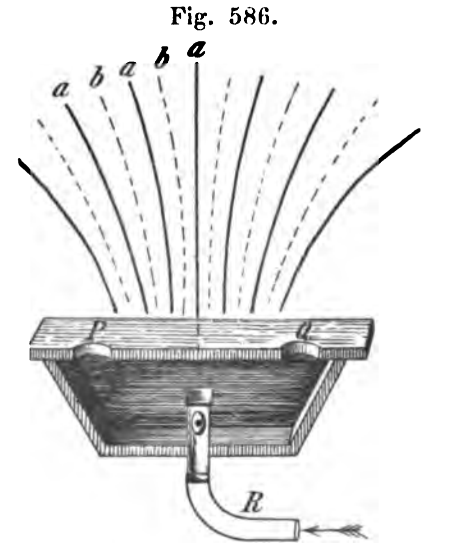
β) Experimentelle Bestätigung der Interferenz von Schallwellen.

1. Apparat von Desains.

Frage 1078. In welcher Weise hat Desains die Richtigkeit der vorstehenden theoretischen Erörterungen durch Experimente bewiesen?

Erkl. 1003. Auch mit dem Gehör kann man diese Interferenzerscheinung sehr gut wahrnehmen, wenn man das Ohr mit den zu untersuchenden Punkten durch eine Röhre in Verbindung setzt. Versetzt man den auf dem Tische liegenden Apparat in langsam drehende Bewegung um eine vertikale Achse, so kann man in geringer Entfernung den Wechsel in der Tonstärke sehr gut wahrnehmen. Auf einer der Linien *aaa* hört der Beobachter jedesmal den Ton verstärkt, auf einer der Linien *bbb* aber sehr geschwächt.

Fig. 586.



Antwort. Um die Interferenz zweier gleichen Tonquellen von gleichen Phasen wahrzunehmen, benutzte Desains einen Holzkasten, (Fig. 586) der im Innern wattiert war, um jede Schallreflexion auszuschließen; derselbe trug senkrecht auf seinem Boden eine kräftig tönende Pfeife, welcher die zum Anblasen nötige Luft durch das Rohr R zugeführt wurde, während die Oberseite mit zwei Löchern P und Q versehen war, die zur Mittelsenkrechten symmetrisch liegen und die beiden Schwingungsmittelpunkte bilden. Wird nun die Pfeife angeblasen, so kann man die Stärke der Luftschwingungen mittelst einer kleinen über einen Ring gespannten und mit etwas Sand überstreuten Membran beobachten. Wo die Schwingungen am stärksten sind, gerät der Sand in heftige Bewegung.

Noch deutlicher als durch die Schwingungen einer solchen Membran zeigt man die Interferenz mittelst einer empfindlichen Flamme von hohem Druck. Hierbei ordnet man den Apparat so an, dass die Wand mit den beiden Löchern vertikal steht, und Schallreflexionen von nahe befindlichen Gegenständen vermieden werden.

---

2. Klangplatten.

Frage 1079. In welcher Weise hat schon Viets (im Jahre 1804) mit Hilfe tönender Klangplatten die Interferenzerscheinungen nachgewiesen?

Antwort. Bringt man eine Klangplatte zum Tönen, so dass das diagonale Kreuz entsteht (Fig. 587), so schwingen die nebeneinander liegenden Quadranten, z. B. 1 und 2 gleichzeitig nach entgegengesetzten Richtungen, indem, wie wir bereits im II. Bande der Akustik (Seite 101) gesehen haben, die Knotenlinien zwei in entgegengesetzter Phase befindliche Teile der Scheibe trennen. Führt man nun die dem Ohre parallel gehaltene Klangplatte dicht am Ohre vorüber, so verschwindet der Ton jedesmal, wenn das Ohr sich vor einer Knotenlinie befindet. Von dem einen Quadranten wird dann ein Wellenberg ins Ohr gesandt und zugleich von dem andern ein Wellental; die Bewegung des Trommelfells ist daher infolge der einen Welle die entgegengestzte derjenigen der andern Welle, die Bewegung und somit der Schall hört auf.

Erkl. 1004. Statt der Klangscheibe wendete Dove eine kreisrunde Glocke an. Während des Tönens krümmt sich diese elliptisch und zwar so, dass die Brennpunkte dieser Ellipse, wenn sie in dem einen Durchmesser im Mittelpunkte zusammengefallen sind, dann sogleich in dem darauf senkrechten Durchmesser auseinander gehen. Die von 4 Punkten, welche um Quadranten voneinander abstehen, ausgehenden Verdichtungen und Verdünnungen heben sich bei ihrem Zusammentreffen in der Mitte daher vollkommen auf. Zu diesem Versuche reicht die Glasglocke einer Luftpumpe aus, die man angeschlagen oder mit dem Violinbogen gestrichen vor dem Ohre vorüberführt.

Fig. 587.



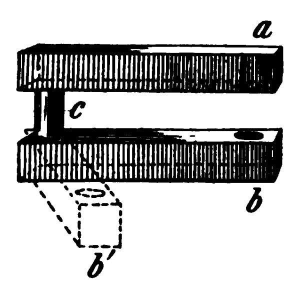
Frage 1080. In welcher Weise hat Hopkins (1835) die Interferenz an schwingenden Klangplatten nachgewiesen?

Antwort. Mit Hilfe zweier parallel laufenden Röhren *a* und b (Fig. 588), welche nahe ihrem einen Ende an den einander zugekehrten Seiten zwei einander gegenüberstehende Oeffnungen hahaben, während sie am anderen Ende durch eine Querröhre verbunden sind, um welche sie sich

Erkl. 1005. Der ursprüngliche Hopkins'sche Versuch wurde mit einer *Y*-förmigen Röhre ausgeführt und damit die entgegengesetzten Schwingungsrichtungen benachbarter Quadranten

tönender Klangplatten in der Weise nachgewiesen, wie bereits auf Seite 114 des II. Bandes der Akustik beschrieben wurde.

Fig. 588.



drehen lassen. Jede der beiden Röhren *a* und *b* hat denselben Eigenton wie die Klangplatte. Bringt man letztere zum Tönen und hält man die Röhre *a* über einen der schwingenden Quadranten, während man die zweite Röhre seitwärts nach *b'* dreht, so wird der Ton durch Mittönen der Röhre *a* verstärkt; bringt man jedoch die zweite Röhre nach *b* unter die erste, so nimmt die Kraft des Tones ab, denn in demselben Augenblicke, wo der Quadrant nach oben schwingt und in der oberen Röhre *a* eine Luftverdichtung herbeiführt, in demselben Augenblicke entfernt er sich von der unteren Röhrenmündung, wodurch zugleich eine Verdünnung entsteht, so dass die Luftgeschwindigkeit in beiden Mündungen gleich groß aber entgegengesetzt gerichtet ist.

Frage 1081. Wie können wir in noch einfacherer Weise (nach Lissajous) die Interferenz der Wellen einer schwingenden Scheibe nachweisen?

Antwort. Bringen wir die vorerwähnte Klangplatte zum Tönen und halten wir die flache Hand über einen der Quadranten, so wird der Ton verstärkt, weil hierdurch die Interferenz angrenzender Schwingungsfelder aufgehoben wird. Halte ich beide Hände über zwei a n s t o ß e n d e Quadranten, so tritt keine Tonverstärkung ein; halte ich die Hände jedoch über zwei einander g e g e n ü b e r l i e g e n d e Quadranten, so erfolgt eine deutliche Tonverstärkung. Auch wenn man eine Hand über der Oberfläche der Scheibe hin- und herbewegt, steigert sich der Ton, wenn die Hand über einem schwingenden Quadranten sich befindet, während der Ton schwächer wird, wenn die Hand über der Knotenlinie hingleitet. Durch Annähern und Entfernen

Erkl. 1006. Lissajous wandte dasselbe Prinzip in sehr eleganter Form an, indem er über eine in 6 Sektoren tönende Klangplatte eine gleich große Scheibe hielt, von deren 6 Sektoren einer um den andern ausgeschnitten war. Siehe Zeichnung und Beschreibung auf Seite 114 des II. Bandes der Akustik.

Hält man eine mit dem Plattentone gleichgestimmte ziemlich weite Röhre vertikal und genau mit ihrem Durchmesser über eine der Knotenlinien einer horizontal befestigten tönenden Klangplatte, so erfolgt kein Mittönen; dasselbe tritt jedoch ein, wenn man zwischen Röhre und Scheibe ein Kartenblatt derart hält, dass die Schwingungen auf der einen Seite bis zur Knotenlinie abgegrenzt werden.

Wird derselbe Versuch mit einer gleichen Röhre ausgeführt, die aber an ihrem oberen Ende mit einer Membran verschlossen ist, auf welche man etwas Sand streut, so wird im ersten Falle der Sand in Ruhe bleiben, im andern aber bewegt werden und eine Figur bilden.

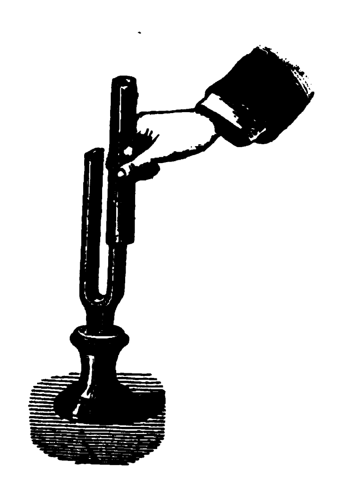
der Hände kann man die Schwingungen der Quadranten mehr oder weniger abfangen.

---

3. Interferenzerscheinungen an Stimmgabeln.

Frage 1082. Warum hört man den Ton einer Stimmgabel in größerer Entfernung fast gar nicht, wenn man sie frei in die Luft hält, sondern erst dann, wenn sie auf einen Resonanzboden gestellt wird?

Fig. 589.



Erkl. 1007. Wenn ein an einer senkrecht aufgestellten Membran hängendes Pendelchen in größerer Entfernung durch eine unisono tönende Stimmgabel heftig abgestoßen wird, so bleibt dasselbe, wie Gripon 1874 nachgewiesen hat, in größter Nähe fast ganz in Ruhe, und der Ton der Stimmgabel klingt sehr schwach.

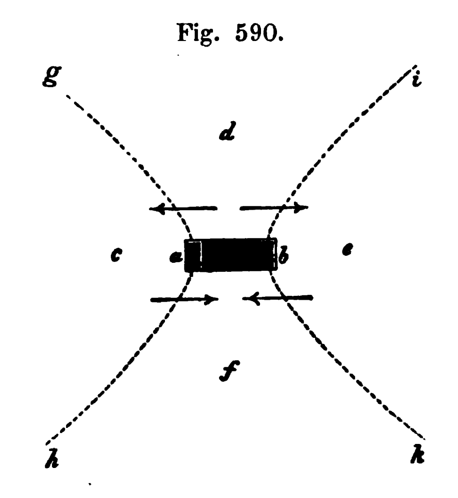
Antwort. Diese Tonschwäche der Gabel rührt zum großen Teile von der Interferenz her, indem sie zwei Systeme von gleich langen Tonwellen erregt, die eine Phasendifferenz von einer halben Welle besitzen. Das erste System geht von der Innenseite der Zinken aus, das zweite von deren Außenfläche. Während die Innenseiten der Zinken die Luft zusammenpressen, wird dieselbe von den Außenflächen derselben verdünnt, und umgekehrt. Die beiden Wellensysteme müssen sich daher in Entfernungen, für welche man die Luftverdichtungspunkte mit denen der Luftverdünnung als annähernd zusammenfallend betrachten kann, gegenseitig aufheben. In unmittelbarer Nähe der Stimmgabel hat dagegen teilweise das eine, teilweise das andere System das Uebergewicht.

Schieben wir eine Papprohre über die eine Zinke, mit der Vorsicht, dass wir die Zinke nicht berühren, so wird der Schall sogleich lauter, indem wir dadurch die Schwingungen der bedeckten Zinke auffangen und beseitigen, so dass die andere Zinke ungestört allein wirken kann.

Frage 1083. Welche Erscheinung kann man beobachten, wenn man eine angeschlagene Stimmgabel dem Ohre nähert und sie um ihre Längsachse dreht?

Erkl. 1008. Befestigt man die Gabel auf einer Schwungmaschine und versetzt sie, zum Tönen gebracht, vor einem Resonator in rasche Drehungen, so werden, je nach der Schnelligkeit derselben, entweder Schwebungen erfolgen, oder es wird vollständiges Verstummen eintreten.

Fig. 590.



Am vollständigsten zeigt sich die Wirkung der Interferenz zwischen einer singenden Flamme und einem an die untere Mündung des Flammenrohres gehaltenen gleich gestimmten Fläschchen.

Antwort. Man wird finden, dass es 4 Stellungen gibt, in denen man den Stimmgabelton deutlich hört, während er in 4 dazwischen liegenden Stellungen unhörbar wird. Die 4 Stellungen starken Schalles sind diejenigen, wo entweder eine der beiden Zinken oder eine der beiden Seitenflächen der Gabel dem Ohre zugekehrt ist. Dazwischen liegen die Stellen ohne Schall nahezu in Ebenen, die unter 45° gegen die Flächen der Zinken durch die Achse der Gabel gehen. Stellt Fig. 590 *a* und *b* die Enden der Gabel vor, so sind *c, d, e* und *f* Orte starken Schalles, die punktierten Linien dagegen bezeichnen die Orte der Ruhe. Die Pfeile über und unter *a b* bezeichnen die gleichzeitige Richtung der Bewegung beider Zinken, durch welche, sowohl beim Auswärts- als auch beim Einwärtsschwingen einander entgegengesetzte Impulse auf die umgebende Luftmasse ausgeübt werden, welche auf den Hyperbelarmen *gah* und *ibk* gleiche Stärke haben und sich daher vollständig aufheben, so dass auf diesen Kurven der Ton ganz verschwindet.

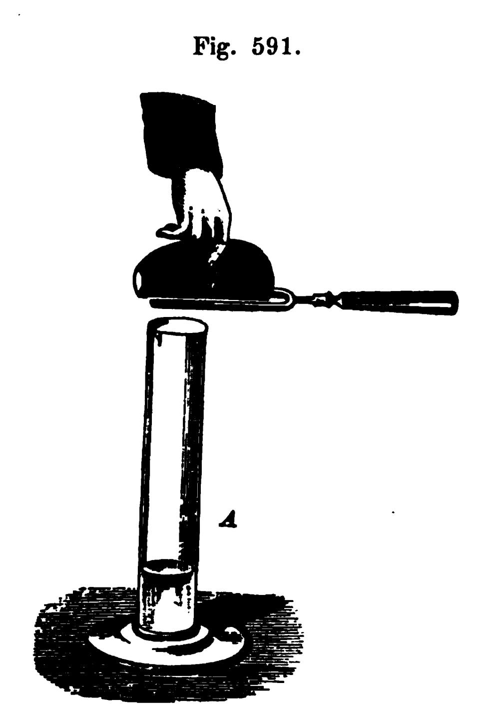
Frage 1084. In welcher Weise läßt sich die Interferenz der Stimmgabelschwingungen mittelst der Resonanz vernehmbar machen?

Erkl. 1009. Der Versuch läßt sich auch in der Weise abändern, dass man statt der Flasche eine mit einem verschiebbaren Pfropfen versehene Röhre verwendet. Wird deren Mündung jener des Kästchens genähert, während die Gabel klingt, und der Luftraum der

Antwort. Halten wir eine schwingende Gabel über ein Gefäß, dessen Eigenton mit dem der Gabel übereinstimmt und drehen wir die Gabel langsam um ihre horizontale Achse, so entsteht bei 4 Stellungen ein lauter Widerhall; bei 4 anderen Stellungen herrscht Stille, während abwechselndes An- und Abschwellen des Tones die Umdrehung der Gabel begleitet. Wenn wir die Gabel mit der Kante

Röhre durch Verschieben des Pfropfens allmählich abgeändert, damit aber innegehalten, sobald der Ton verschwunden ist, so wird man finden, dass der Ton der Röhre genau mit jenem der Gabel übereinstimmt. Auch bei Annäherung der Oeffnung eines zweiten gleichgestimmten Klangkästchens an jene eines solchen Kästchens, dessen Gabel tönt, tritt die Tonschwächung bis nahe dem Verschwinden ein.

Fig. 591.



nach unten und mit ganz erloschenem Tone über das Gefäß halten, und eine Pappröhre über eine ihrer Zinken schieben, wie in Fig. 591, so verkündet eine laute Resonanz, dass die Schwingungen von dieser Zinke vernichtet sind. Hierbei muß die Gabel über die Mitte des Gefäßes gehalten werden, so dass die Luft gleichmäßig auf beiden Seiten derselben verteilt ist. Bewegt man die Gabel von der Mitte aus nach dem Rande, ohne ihre Neigung zu ändern, so erfolgt ein lauter Ton. Hält man die Gabel nicht mit der Kante nach unten, sondern beide Zinken in derselben horizontalen Ebene, so findet man bald eine Stelle nahe am Rande des Gefäßes, wo der Ton erlischt.

Ein einfaches Beispiel der Interferenz eines Klanges mit einem durch dessen Resonanz hervorgerufenen zweiten von gleicher Tonhöhe liefert ein der Mündung des Resonanzkästchens einer tönenden Stimmgabel genähertes Fläschchen gleicher Tonhöhe. Der Ton verschwindet fast vollständig, weil die gegenseitigen Resonanzimpulse notwendig in entgegengesetzten Phasen erfolgen. (Siehe Erkl. 1009.)

---

4. Interferenzpfeifen.

Frage 1085. Welche Erscheinung können wir beobachten, wenn wir zwei offene oder gedeckte Pfeifen, die auf dem Windkasten nahe nebeneinander stehen und gleiche Tonhöhe haben, zugleich anblasen?

Antwort. Jede Pfeife für sich allein angeblasen, gibt einen starken Ton; blasen wir aber beide Pfeifen zugleich an, so verschwindet der Ton beinahe gänzlich, und wir hören nur das Geräusch der an der Oberlippe brandenden Luft. Diese Erscheinung erklärt sich aus den entgegengesetzten Schwingungen der Anblaseströme infolge

Erkl. 1010. Sind bei nebenstehendem Versuche die beiden gleichgestimmten Pfeifen g e d e c k t, so haben sie den ungeraden Zahlen entsprechende Töne,

welche sich vermöge der Welleninterferenz nahezu aufheben. Benutzen wir *offene* Pfeifen, oder Zungenpfeifen, so verlöschen zwar die Grundtöne und die ungeradzahligen Partialtöne, weil sie sich um eine ungerade Anzahl halber Schwingungsphasen unterscheiden, aber die *geradzahligen harmonischen Töne*, deren Phasenunterschied eine *gerade* Anzahl halber Wellenlängen ausmacht, sind hörbar, und zwar die erste höhere Oktave am stärksten, so dass der Klang der beiden gleichgestimmten und gleichzeitig angeblasenen Pfeifen im Ganzen schwächer als jener einer einzigen der beiden Pfeifen erscheint, dass aber die nächst höhere Oktave vorzugsweise hörbar ist.

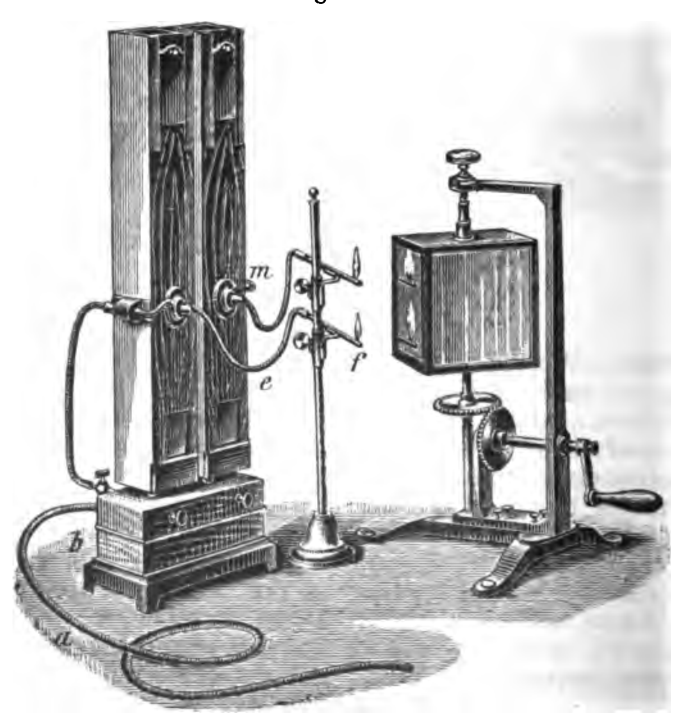
des wechselnden Zustandes der umgebenden Luft. Erreicht nämlich die Verdichtung in der einen Pfeife ihr Maximum, so wird ihre Luftzunge nach außen gedrückt, und es entsteht da eine Verdichtung, welche der Zunge der anderen Pfeife dieselbe Bewegung zu gleicher Zeit nicht gestattet. *Es tritt demnach in dem Knoten der einen Pfeife eine Verdichtung ein, wenn in dem der andern eine Verdünnung stattfindet.*



Frage 1086. In welcher Weise hat König diesen Schwingungszustand zweier im Einklang befindlichen Pfeifen *sichtbar* gemacht?

Antwort. König hat jede der beiden Pfeifen *im Knotenpunkte ihres Grundtones* mit einer Flammenkapsel in Verbindung gebracht, wie wir eine

Fig. 592.



Erkl. 1011. Setzt man zwei Orgelpfeifen, die miteinander im Einklange stehen, mit zwei Flammen in Verbindung, und läßt nur eine Pfeife ertönen, so zeigt die Flamme der andern, dass die in derselben eingeschlossene Luftsäule durch Kommunikation in Mitschwingung versetzt wird, und diese Mitteilung der Schwingungen findet noch statt, wenn die Orgelpfeifen nicht mehr im genauen Einklange miteinander sind, und also zusammen angeblasen Stöße hören lassen. Es bilden sich in diesem Falle in der influenzierten Pfeife nicht ihre Eigenschwingungen, sondern nur Schwingungen, die genau unisono sind mit der influenzierenden, so dass sich Stöße weder hören noch auch in der Flamme beobachten lassen. Bläst man aber auch die zweite Orgelpfeife an und erregt somit ihre Eigenschwingungen, so kombinieren sich diese mit den Resonanzschwingungen, und die Flamme zeigt durch ihre heftigen Zuckungen Stöße an, welche man auch deutlich vernimmt.

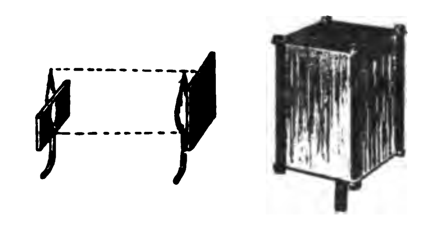
Fig. 593.



Erkl. 1012. Die nebenerwähnten abwechselnden Schwingungszustände lassen sich, gleichzeitig sichtbar und hörbar, durch kleine Zungen nachweisen, welche man nebeneinander auf ein Sauggebläse setzt und ein wenig gegeneinander verstimmt. Noch deutlicher wird der Vorgang, wenn man die beiden Flammen (Fig. 592) nicht übereinander anordnet, sondern in der Sehlinie zusammenfallen läßt, die dem rotierenden Spiegel zunächst stehende Flamme gegen diesen abblendet, die zweite aber

solche schon im II. Bande der Akustik, Seite 216 kennen lernten. (Siehe Fig. 592.) Die beiden Gasbrenner sind längs eines Stabes, einer über dem andern, verstellbar. Das Leuchtgas kommt in diese Brenner *f* mittelst kleiner Kautschukkanäle *e* aus den in der Pfeife mit Membranen geschlossenen Kapseln *m*. Sind die beiden Pfeifen auf den genauen Einklang gestimmt, z. B. beide auf c', und bläst man sie gemeinschaftlich aus einer kleinen Windlade *b* an, so hört man den Ton schwächer, als wenn eine der Pfeifen allein angeblasen wird, weil, wie schon oben bemerkt wurde, die von den beiden Knotenpunkten in die Luft übertretenden Wellen mit entgegengesetzten Phasen aufeinandertreffen und einander schwächen. Hat man nun die beiden Flammen untereinander gestellt, und dreht den vor ihnen aufgestellten Spiegel rasch um seine Achse, so werden dadurch die Bilder der vibrierenden Flammen in ihre einzelnen Elemente aufgelöst. Man sieht dann untereinander zwei Reihen von Flammenbildern, von welchen je zwei Bilder mit Bezug auf dieselbe Lotrechte so stark verschoben erscheinen, dass fast stets ein oberes Bild mit einem unteren Bilde wechselt

Fig. 594.



und sie nahezu zwischen einander fallen (siehe Fig. 593). Daraus folgt, dass die zu den aufzuckenden Flammen notwendigen

in ihrer untern Hälfte mittelst eines kleinen Spiegels derart verdeckt, dass dieser den Fuß der vorderen Flamme reflektiert (Fig. 594). Die Wechselwirkung läßt sich jetzt sehr gut beobachten, indem zwischen je zwei Spitzen ein Fuß sichtbar wird, wie es Figur 595 deutlich macht.

Die Interferenzpfeifen mit Flammenzeigern, der Figur 592 entsprechend, liefert die Firma Max Kohl, Chemnitz, zum Preis von Mk. 165.

Verdichtungen der Luft nicht gleichzeitig auftreten, sondern in der einen Pfeife früher als in der andern.

Fig. 595.



5. Interferenzerscheinungen an Sirenen.

Frage 1087. Durch welche interessanten Versuche mittelst der Lochsirene hat Seebeck Interferenz des Schalles nachgewiesen?

Antwort. Läst man durch zwei Röhren von entgegengesetzten Seiten her zwei Luftströme gegen die Lochreihe einer Sirene, senkrecht gegen die Scheibe wirken, in der Art, dass die Röhren während der Umdrehung der Scheibe gleichzeitig zwei verschiedenen Löchern gegenüberstehen, so hört man keinen Ton, sondern nur das Sausen der durchströmenden Luft, wiewohl jeder einzelne Luftstrom, wenn er allein wirksam ist, deutlich ein und denselben Ton hervorbringt. Im ersteren Falle heben sich nämlich die beiden entgegengesetzten Luftströme während

Fig. 596.



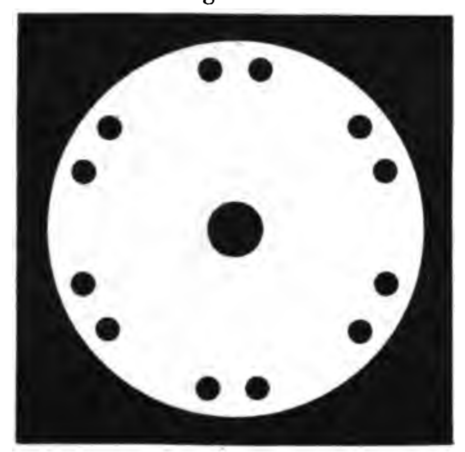
Erkl. 1013. Wenn sich in der Scheibe zwei konzentrische Lochreihen befinden, von denen die eine doppelt so viele Löcher hat als die andere (Fig. 596) so hört man beim gleichzeitigen Anblasen beider Löcherreihen von derselben Seite her zwei Töne, deren einer die Oktave des andern ist. Geschieht aber das Anblasen von entgegengesetzten Seiten her, dergestalt, dass jeder Luftstoß des tieferen Tones mit einem des höheren zusammentrifft, so verschwindet der höhere Ton und der tiefere wird allein gehört. Hier wird der Luftstoß, welcher durch ein Loch der inneren Reihe hervorgebracht wird, durch den entgegengesetzten des gleichzeitig angeblasenen Loches der äußeren Reihe aufgehoben, so dass die Hälfte der Luftstöße der äußeren Reihe ohne Wirkung bleibt und derselbe Ton gehört wird, als wenn nur die andere Hälfte der äußeren Löcher vorhanden wäre. Dieser Ton ist also die nächst tiefere Oktave des allen äußeren Löchern entsprechenden Tones.

Erkl. 1014. Eine eigentümliche Erscheinung bietet der Fall dar, wenn die Löcher nicht gleich weit vonein-

ander entfernt sind, sondern immer ein größerer Zwischenraum mit einem kleineren abwechselt, doch so, dass alle kleineren Zwischenräume unter sich und alle größeren unter sich gleich sind. (Fig. 597.) Bläst man nun einen Luftstrom gegen die Scheibe, während sie umgedreht wird, so hört man einen solchen Ton, als ob nur halb so viele Löcher da wären. Es scheinen sich hier die beiden in kürzeren Zwischenräumen aufeinanderfolgenden Luftstöße zu einem einzigen zu vereinigen, und das um so mehr, je bedeutender der Unterschied der größeren und kleineren Zwischenräume ist. Ist dagegen die Differenz dieser Zwischenräume weniger ungleich, so hört man neben jenem Tone auch seine nächst höhere Oktave, welche der Gleichheit aller Zwischenräume entspricht.

ihrer Fortpflanzung und also auch im Ohre des Beobachters gegenseitig auf. Werden die Löcher nicht gleichzeitig, sondern alternierend von den entgegengesetzten Luftströmungen getroffen, so hört man den ursprünglichen Ton verstärkt.

Fig. 597.



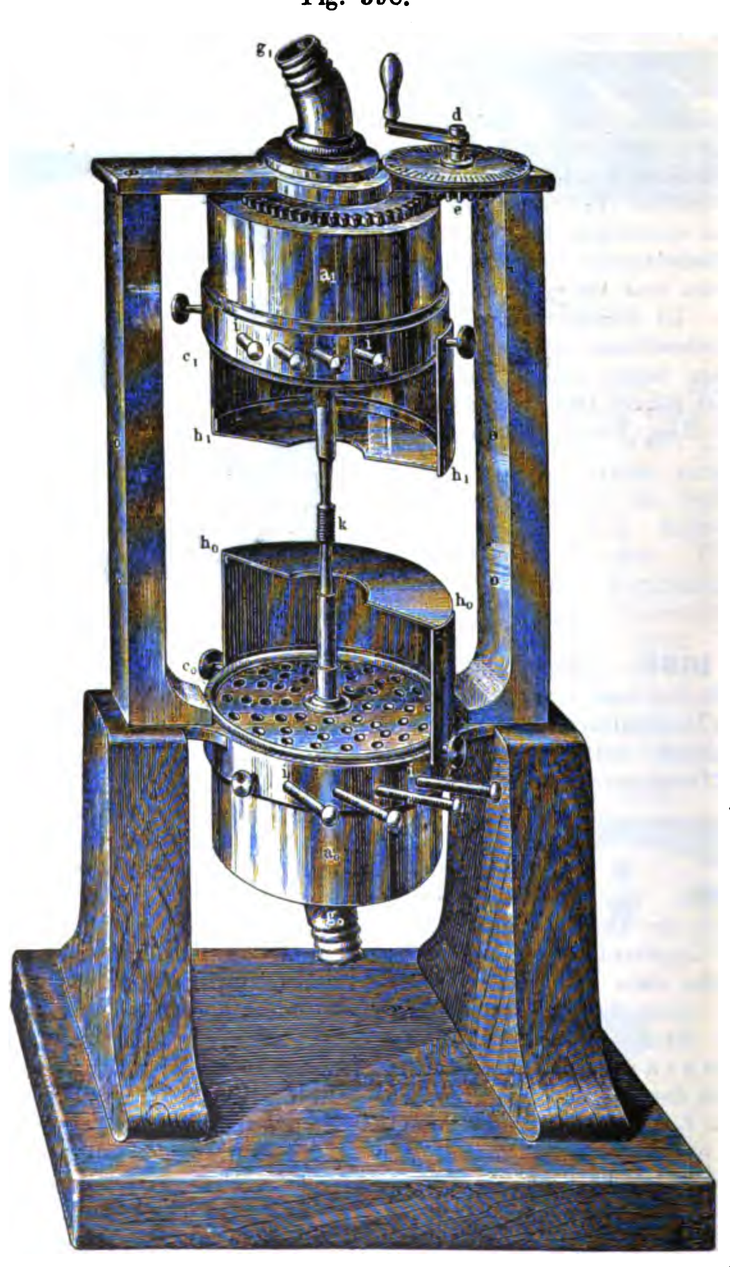
Frage 1088. Welche Einrichtung zeigt die von Helmholtz konstruierte Doppelsirene, die sich ausgezeichnet zur Beobachtung der Interferenzerscheinungen eignet?

Erkl. 1015. Wir haben bereits im ersten Bande der Akustik, Seite 127, die Sirene von Cagniard Latour kennen gelernt, welche dazu dient, die Schwingungszahl eines Tones festzustellen. Bei dieser Sirene hat die rotierende Scheibe nur einen Kreis von Löchern. Dove versah dieselbe mit mehreren konzentrischen Löcherreihen und brachte unter der ebenso eingerichteten festen Scheibe konzentrische Ringe an, von denen ein jeder ebenso viele Löcher besitzt, wie die über ihm liegende Reihe. In Figur 600 ist eine solche mehrstimmige Dove'sche Sirene und in Figur 601 die innere Einrichtung der konzentrischen Ringe mit den

Antwort. Die Doppelsirene von Helmholtz besteht aus zwei mehrstimmigen Dove'schen Sirenen (siehe Erkl. 1015) und ist in Figur 598 in perspektivischer Ansicht dargestellt. a_0 und a_1 sind die Windkästen der beiden Sirenen, c_0 und c_1 die Scheiben, welche auf einer gemeinsamen Achse festsitzen, die bei k eine Schraube trägt, um ein Zählwerk zu treiben, welches so eingesetzt werden kann, wie es Figur 599 zeigt. Der obere Kasten a_1 kann selbst um seine Achse gedreht werden. Zu dem Zwecke ist er mit einem Zahnrade versehen, in welches das kleinere mit einer Kurbel d versehene Zahnrad e eingreift. Die Achse des Kastens a_1, um die er sich dreht, ist eine Verlängerung des oberen Windrohres g. Auf jeder der beiden Sirenenscheiben sind vier Löcherreihen, die einzeln oder

Löcherreihen abgebildet. Die Ringe sind mittelst der Messingstifte 1, 2, 3, 4 drehbar. Die an den Messingstiften

Fig. 598.



außen angebrachten Spiralfedern halten die Stifte in derartigen Lagen, dass die den Ringen zugehörigen Löcher-

beliebig verbunden angeblasen werden können; bei *ii* sind die Stifte, welche die Löcherreihen

vermittelst einer besonderen Einrichtung öffnen (siehe Erkl. 1015). Die untere Scheibe hat 4 Reihen

reihen der drehbaren Scheibe für gewöhnlich geschlossen sind. Durch einen Druck auf einen Messingstift wird der



Fig. 599.

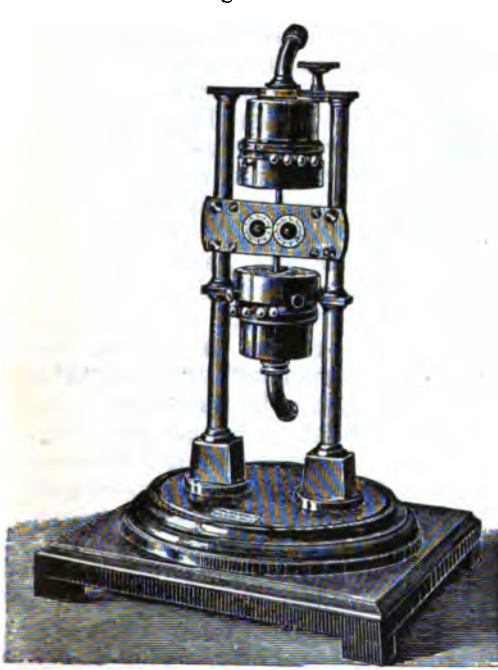


Fig. 600.



mit dem Stifte verbundene Ring gedreht und die zugehörige Löcherreihe geöffnet. Auf diese Weise kann man von 8, 10, 12, 18 Löchern, die obere von 9, 12, 15, 16. Gibt also der Kreis von 8 Löchern den Ton *c*, so hat die untere Scheibe die Töne *c, e, g, d'*, die obere *d, g, h, c'*, es ist somit möglich, eine Menge von Kombinationen hervorzubringen. Die Töne der Sirene sind scharf, weil sie starke Obertöne von hoher Ordnungszahl enthalten. Um diese letzteren zu dämpfen, hat Helmholtz zylindrische Messingkästen fertigen lassen, von denen man bei h_1 h_1 und h_0 h_0 die hintere Hälfte sieht. Diese Kästen sind in je zwei Hälften zerschnitten, so dass man sie abnehmen, wieder aufsetzen und dann durch Schrauben auf dem Windkasten befestigen kann. Wenn der Sirenenton sich dem Grundtone dieser Kästen nähert, wird der Klang voll, stark und weich, wie ein schöner Hornton. Gleichzeitig braucht man wenig Luft, aber starken Druck, um die Sirene zu Interferenzversuchen geeignet zu machen.

Wir denken uns nun z. B. die Reihe von 12 Löchern in jedem Kasten geöffnet, so dass wir einen Einklang erhalten. Stehen sich bei beiden Sirenen die Löcher gerade gegenüber, so fallen die gleichen Phasen des Grundtones sowohl wie sämtliche Obertöne zusammen; die Töne verstärken sich also sämtlich. Drehen wir die Kurbel *d* dagegen um 45°, was einer Drehung des oberen Kastens um $^1/_{24}$ der Peripherie, oder einem halben Abstande der Löcher in der angeblasenen Reihe von 12 Löchern entspricht, so beträgt die Phasendifferenz der beiden Grundtöne eine halbe Schwingungsdauer, die Luftstöße des einen Kastens fallen gerade in die Mitte zwischen die des anderen, und die beiden Grundtöne vernichten sich gegenseitig. Aber die Phasendifferenz ihrer höheren Oktaven beträgt unter denselben Um-

sowohl einen Ton allein oder auch mehrere Töne gleichzeitig ansprechen lassen.

Fig. 601.



Die mechanischen Werkstätten von Ferdinand Ernecke, Berlin SW. liefern eine Helmholtz'sche Doppelsirene, der Fig. 599 entsprechend, zu dem Preise von Mk. 300.

ständen eine ganze Schwingungsdauer, d. h. sie verstärken sich gegenseitig, und so vertärken sich in der gleichen Stellung alle geradzahligen harmonischen Töne, während die ungeradzahligen sich aufheben. In der neuen Stellung wird der Ton also schwächer, weil eine Anzahl seiner Töne fortfällt; aber er hört nicht ganz auf, sondern schlägt vielmehr in seine Oktave um. Drehen wir die Kurbel wiederum um einen Winkel von 45°, so dass die ganze Drehung einen rechten Winkel beträgt, so fallen die Luftstöße beider Scheiben wieder genau zusammen, und die Töne verstärken sich. Bei einer vollständigen Umdrehung der Kurbel findet man also vier Stellungen, bei denen sich der Ton mit allen seinen Elementen verstärkt, und vier andere dazwischen liegende, wo der Grundton nebst allen geradzahligen Obertönen verschwindet, und dafür die höhere Oktave zum Erklingen gebracht wird. (Helmholtz, Tonempfindungen.)

6. Interferenzröhren.

Frage 1089. Zu den Interferenzbildungen der vorher betrachteten Art gehört das Zusammentreffen entgegengesetzter Schwingungsphasen zweier tönenden Körper; unter welchen Umständen genügt aber schon eine Tonquelle, um Interferenzerscheinungen herbeizuführen?

Erkl. 1016. Die Interferenz von Schallwellen gleicher Wellenlänge, welche verschieden lange Wege zurückzulegen haben, läßt sich am besten zeigen bei Anwendung der hohen und kräftigen Longitudinaltöne geriebener Glasröhren; die gewöhnlichen Stimmgabeltöne haben zu große Wellenlänge, und die schrillen Töne einer kleinen Pfeife oder chemi-

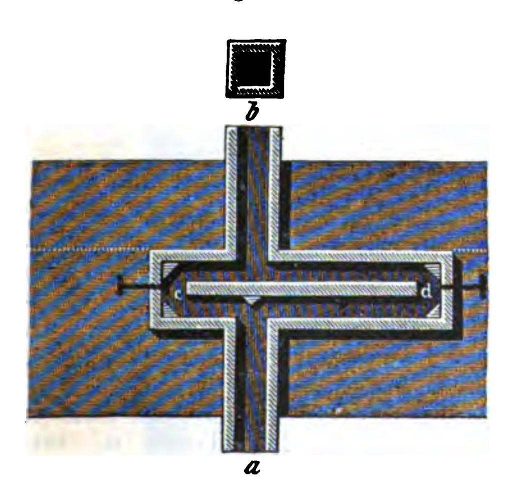
Antwort. Da jede schwingende Bewegung irgend eines Körperteilchens in einem Vorstoße mit darauf folgendem Rückpralle besteht, woraus sich eine Verdichtung mit darauf folgender Verdünnung ergibt, so kann schon ein einzelner Klang mit sich selbst interferieren, wenn wir denselben z. B. auf zwei verschieden langen Wegen zu unserem Ohre leiten. Entspricht dabei die Differenz der beiden Wegelängen der halben Wellenlänge des Tones, so wird auf einem dieser Wege die verdichtende, auf dem andern die verdünnende Welle ankommen, so dass beide sich bei ihrem Zusam-

schen Harmonika, deren offenes Ende man in einen nach der Interferenzröhre führenden Schalltrichter münden läßt, werden leicht durch Rückwirkung von der Röhre aus zum Verstummen gebracht, wenn die Länge der beiden Röhrenzweige um eine ungerade Zahl halber Wellenlängen differiert. Ferner empfiehlt es sich, die Interferenz nicht für das Ohr, sondern für das Auge nachzuweisen, weil die Abhaltung des neben der Interferenzröhre sich fortpflanzenden Schalles vom Ohre sehr umständlich ist.

mentreffen aufheben. Sind beide Wege dagegen gleich lang oder beträgt ihre Differenz eine oder mehrere ganze Wellenlängen, oder wird einer derselben abgesperrt, so hört man den Ton in seiner vollen Stärke.

Frage 1090. Welcher Physiker hat nach dem vorerwähnten Prinzipe zuerst einen Apparat konstruiert, welcher genügende Resultate lieferte, und wie war dieser Apparat eingerichtet?

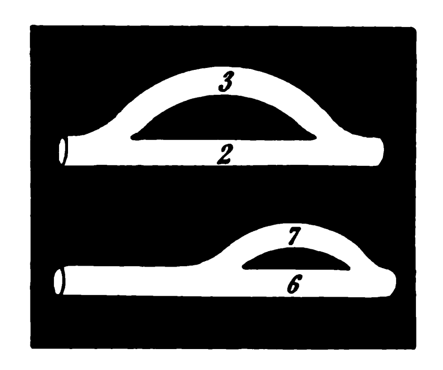
Fig. 602.



Antwort. Nörremberg war der erste, welcher 1833 eine Interferenzröhre konstruierte, welche in Figur 602 im horizontalen Durchschnitte dargestellt ist. Der ganze Apparat ist in eine Wand eingemauert, welche zwei Zimmer so trennt, dass die Luft derselben nur durch die Kanäle des Apparates in Verbindung steht. Die Längen des Apparates sind derart, dass der Weg von *a* über *d* nach b um 30 cm länger ist, als der Weg von *a* über *c* nach *b*. Läßt man daher bei *b* einen Ton von 60 cm Wellenlänge eintreten, wie ihn eine 30 cm lange offene Pfeife bei mäßigem Anblasen gibt, so beträgt der Wegunterschied gerade eine halbe Wellenlänge, und daher ist im andern Zimmer fast nichts zu hören. Dagegen wird der Ton hörbar, wenn man bei *c* oder *d* durch Einsenken eines Schiebers einen der beiden Kanäle absperrt. Bläst man die Pfeife stärker an, so gibt sie ihren ersten Oberton von 30 cm Wellenlänge (nämlich die höhere Oktave des vorigen Grundtones), welcher dann auch bei offenem Schieber im anderen Zimmer stark gehört wird.

Frage 1091. Welcher Art waren die von Kane (infolge eines 1835 von Herschel gemachten Vorschlags) konstruierten Interferenzröhren?

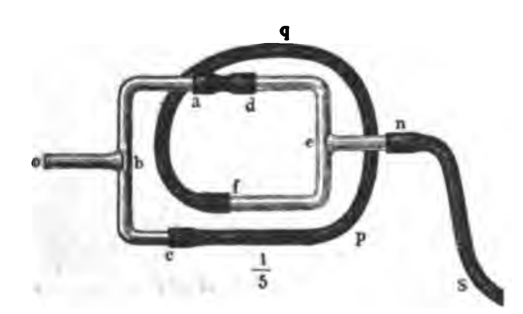
Fig. 603.



Antwort. Kane konstruierte zwei in nebenstehender Figur dargestellte Röhren, in welchen die Schallwellen zwei Wege zurücklegen mußten, die sich in der einen wie 3 : 2, in der andern wie 7 : 6 verhielten. Hierbei bleiben von den Tönen, welche eine solche Röhre geben kann, diejenigen aus, bei welchen die Verdichtungswelle durch die eine Wegeleitung mit der Verdünnungswelle durch die andere zusammenfällt. Bei der Röhre mit dem Verhältnisse 3 : 2 gab die kürzere Röhre allein die Töne *e'*, *e''*, *h''* und *e'''*, die längere allein die Töne *a'*, *e''*, *a''*, *c'''*, *e'''*. Wurden die Röhren zusammengestimmt, so wurden die Töne des längeren Rohres, welche sich auch unter denen des kürzeren Rohres fanden, wie *c''* und *e'''*, mit größerer Deutlichkeit erhalten; *a''* und *h''* schienen ineinander zu fließen, und *e'* war ganz verschwunden. Noch entschiedener waren die Ergebnisse der anderen Röhre mit dem Verhältnisse 7 : 6. Die Tonreihe der kürzeren Röhre allein war *f*, *f'*, *c''*, *f''* und *c'''*, die der längeren *d*, *d'*, *a'*, *d''*, *f''*, *a''* und *d'''*. Beim Anblasen erhielt man die Töne: *d*, *f*, *d''*, *f''*, *a''*, *c'''* und *d'''*, so dass mithin aus den Tönen des kürzeren Rohres die Töne *f'* und *c''*, und aus denen des längeren Rohres die Töne *d'* und *a'* verschwunden waren.

Frage 1092. Welche sehr bequeme Form hat Quinke (1866) der Interferenzröhre gegeben, um mittelst derselben das Stimm-

Fig. 604.



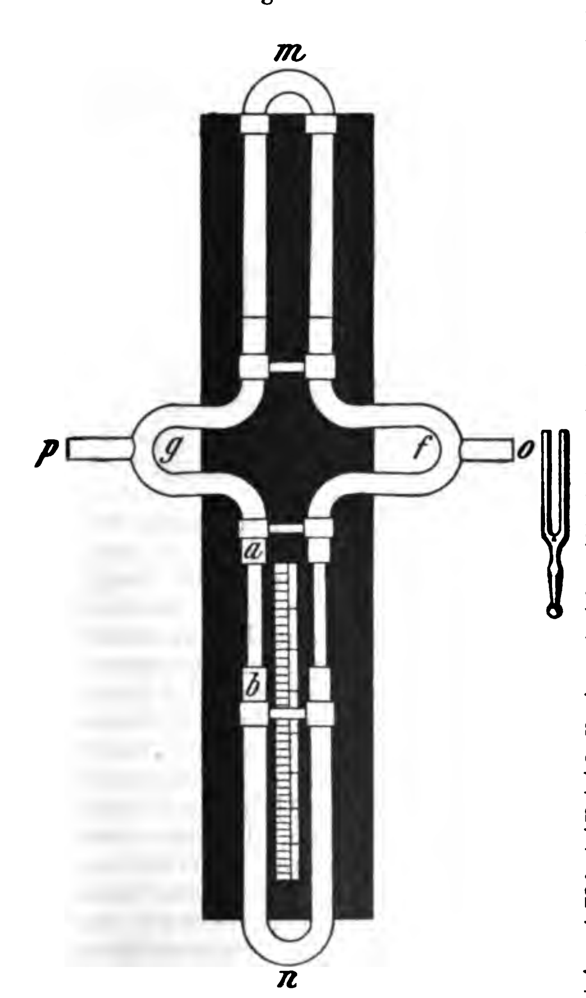
Antwort. Die Enden zweier gabelförmig gebogenen Glasröhren (Fig. 604) sind einerseits durch den kurzen Kautschukschlauch *a d*, andererseits durch den 39 cm längeren Schlauch *cpqf* verbunden, so dass die Differenz der Wege gleich der halben Wellenlänge des Tones *a'* ist, Das eine Ende *o* des Apparates wird mittelst eines kurzen Kautschukrohres in den Gehörgang des einen Ohres eingesetzt, während das andere Ohr verstopft wird. Bringt man hierauf das andere Ende *s* des Apparates in die Oeffnung der mit einer Nor-

malstimmgabel versehenen Klanggabel-a' von 435 Schwingungen und 78 cm Wellenlänge (siehe I. Bd. Seite 182) auszulöschen?

kästchens, so wird man den Ton der in Schwingung versetzten Gabel kaum vernehmen, während er heftig ins Ohr gellt, sobald man einen der Schläuche *a d* oder *cpqf* mit den Fingern zudrückt.

Frage 1093. Welche Einrichtung gibt man der Interferenzröhre, wenn dieselbe geeignet sein soll, nicht nur e i n e n Ton, sondern d i e v e r s c h i e d e n s t e n T ö n e von verschiedener Wellenlänge auszulöschen?

Fig. 605.



Antwort. Zu diesem Zwecke gibt man der Interferenzröhre am besten die Form der Fig. 605. Die Röhre *o f* teilt sich bei *f* in zwei Zweige, deren einer um *n*, der andere um *m* geführt wird. Beide Zweige vereinigen sich bei *g* wieder in dem gemeinschaftlichen Kanale *gp*. Der Teil *b n* der Röhre, welcher über *a b* hingeleitet, kann posaunenartig ausgezogen, also der eine Tonweg beliebig verlängert werden. Hält man eine schwingende Stimmgabel an die Oeffnung bei *o* und das Ohr an die Oeffnung p, so werden bei gleich langen Seitenwegen die Tonwellen aus beiden Röhren das Ohr gleichzeitig erreichen, und der Ton der Stimmgabel wird deutlich hörbar sein. Zieht man *a b* aber aus, so wird schließlich der Fall eintreten, dass der Ton der Gabel erlischt. Letzteres ist der Fall, wenn die Entfernung *a b* $\frac{1}{4}$ der Tonwelle beträgt, d. h., wenn der ganze untere Zweig eine halbe Wellenlänge länger ist, als der obere. Zieht man *b n* noch weiter aus, so wird der Ton wieder hörbar, und wenn die doppelte Entfernung *a b* eine ganze Wellenlänge beträgt, so erreicht der Ton wieder seine anfängliche Stärke. Beträgt *a b* $^1/_2$, $^2/_2$, $^3/_2$ . . . der Wellenlänge des Tones der Stimmgabel, so hört man bei *p* den Ton deutlich; beträgt aber *a b* $^1/_4$, $^3/_4$, $^5/_4$ . . . der Wellenlänge, so ist der Stimmgabelton bei *p* vollständig verschwunden.

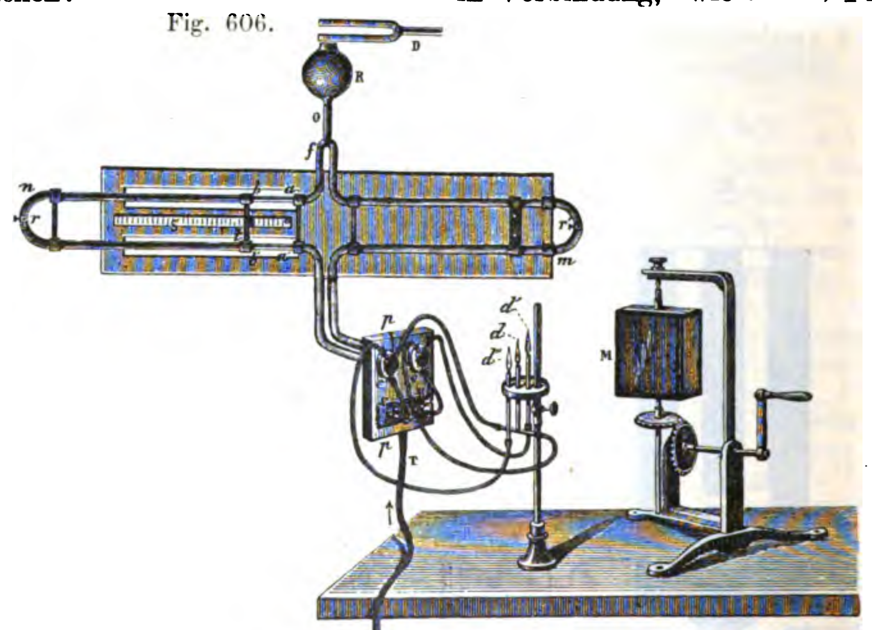
Will man eine sehr vollständige Interferenz erhalten, so muß

einen möglichst einfachen Ton in die Röhre einführen, indem man mit derselben einen Resonator verbindet, vor dem man die entsprechende Stimmgabel tönen läßt.

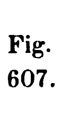
Frage 1094. In welcher Weise hat König denselben Apparat benutzt, um die nämlichen Interferenzerscheinungen s i c h t b a r zu machen?

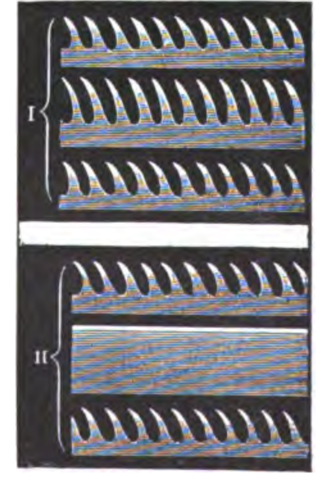
Antwort. König setzte den oben beschriebenen Apparat mit einem Flammenmanometer derart in Verbindung, wie es die Figur

Fig. 606.



606 zeigt. Ist die Entfernung *a b* gleich Null, d. h. sind die beiden Wege über *m* und *n* gleich lang, dann sind die nach den beiden Flammenkapseln *c* und *c'* übertragenen Schwingungsbewegungen gleich intensiv, und vereinigt man dieselben in dem Brenner *d*, dann wird die mittlere Flamme *d* tiefe Zacken zeigen, deren Entfernungen mit denen der Flammen *d'* und *d''* übereinstimmen, die nur von den Teilbewegungen herrühren. Die drei Reihen von gezackten Bändern werden sich demnach in vertikaler Richtung entsprechen, wie es Fig. 607 I zeigt.


Fig. 607.



Wird dagegen der Arm *n* so weit herausgezogen, dass die Strecke *a b* ¼ von der Wellenlänge des Gabeltones beträgt, also der Weg über *n* insgesamt um ½ Wellenlänge größer ist, als der über *m*, dann werden die Bewegungen in den Flammenkapseln *c* und *c'* entgegengesetzt gerichtet sein; infolgedessen bleibt die mittlere Flamme *d* unbeweglich, während die Zacken in *d'* und *d''* abwechseln, wie es Figur 607 II zeigt. Erreicht die Gangdifferenz eine ganze Wellenlänge, dann herrscht wieder Uebereinstimmung.

Frage 1095. Inwiefern läßt sich mit Hilfe einer solchen Interferenzröhre die Wellenlänge jedes einfachen Tones leicht bestimmen?

Antwort. Man braucht nur den Wegeunterschied festzustellen, welcher vollkommene Interferenz herbeiführt. Das doppelte dieses Unterschiedes ist die Wellenlänge; und wenn die Anzahl der Schwingungen zugleich bekannt ist, so kann man daraus unmittelbar die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft berechnen, nach der Formel $l = ct$...

Frage 1096. Inwiefern ist eine solche Interferenzröhre auch zur Beobachtung der Klangfarbe einer Tonquelle geeignet?

Erkl. 1017. Stumpf's Versuche über die Ermittelung der Obertöne (1896) wurden in der Weise ausgeführt, dass aus dem mächtigen Klange einer Zungenpfeife von 50 Doppelschwingungen durch eine Interferenzröhre der achte Oberton von 400 Schwingungen ausgeschlossen, und vor die Mündung des schallleitenden Rohrsystems eine mit Resonanzkasten versehene Stimmgabel von 400 Schwingungen gestellt wurde. Hierbei erfolgte starkes Mitschwingen, wenn der eine der beiden interferierenden Leitungsschläuche zugedrückt wurde und der Gesamtklang durch die an-

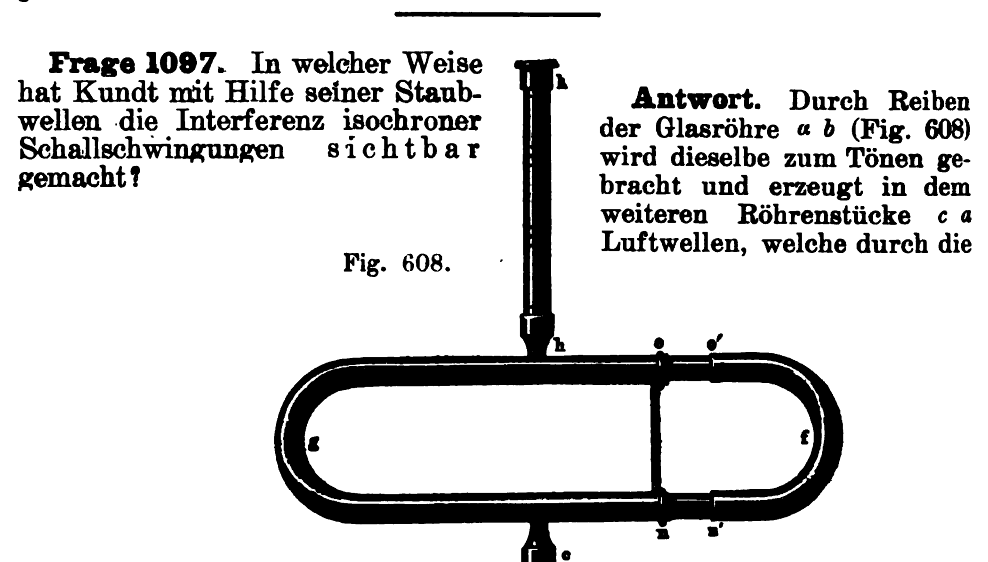
Antwort. Eine solche Interferenzröhre löscht nicht nur einen bestimmten Grundton aus, sondern auch alle seine ungeradzahligen Obertöne; deshalb löscht eine solche Röhre den Klang einer gedeckten Orgelpfeife ganz aus, es bleibt nur das Blasegeräusch zurück; bei einer offenen Orgelpfeife dagegen ä n d e r t sie nur den Klang, da die geraden Partialtöne des Klanges nicht ausgelöscht werden. Man kann deshalb durch eine solche Röhre sofort erkennen, ob in einem Klange nur ungerade, oder ob auch gerade Partialtöne in ihm enthalten sind.

dere Leitung allein passierte; hingegen erfolgte kein Mitschwingen, wenn beide Leitungen des Interferenzapparates offen waren, also der Teilton 400 ausgeschlossen war.

Frage 1097. In welcher Weise hat Kundt mit Hilfe seiner Staubwellen die Interferenz isochroner Schallschwingungen s i c h t b a r gemacht?

Antwort. Durch Reiben der Glasröhre *a b* (Fig. 608) wird dieselbe zum Tönen gebracht und erzeugt in dem weiteren Röhrenstücke *c a* Luftwellen, welche durch die bekannten Staubfiguren sichtbar werden. Bei *c* treten die Luftwellen in einen Doppelkanal von Blech und ziehen zur Hälfte über *g*, zur Hälfte über *f* nach *h*, um hier in das bei *k* verschlossene Glasrohr einzutreten. In *h k* werden nun ebenfalls Staubwellen erzeugt, sobald der Gangunterschied der von beiden Seiten her bei *h* zusammentreffenden Schallwellen gleich Null oder gleich einem ganzen Vielfachen einer halben Wellenlänge ist. Ist dagegen *o' f n'* soweit ausgezogen, dass $o\,o' + n\,n' = {}^1/_2$ Wellenlänge ist, so beträgt der Gangunterschied der bei *h* zusammentreffenden Schallstrahlen gleichfalls $^1/_2$ Wellenlänge, ihr Zusammenwirken kann also in *h k* keine stehenden Luftwellen und keine regelmässigen Staubfiguren erzeugen.

Fig. 608.



Frage 1098. In welcher Weise hat Antolik den von Kundt zusammengestellten Apparat, welcher durch die zu großen Ausdehnungen unbequem wird und dem Beobachter eine genaue Kontrolle der zu weit entfernten Staubfiguren erschwert, handlicher gemacht?

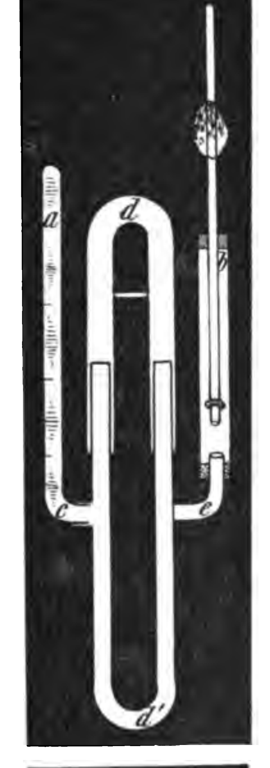


Fig. 609.

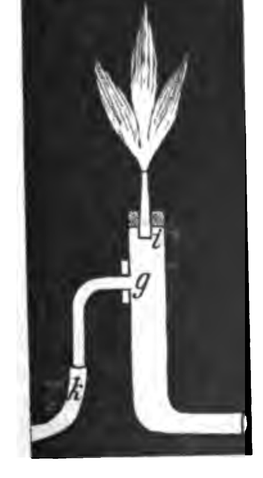


Fig. 610.

Antwort. Antolik hat den Kundt'schen Apparat so umgestaltet, dass die Röhren *ca* und eb (Fig. 609) gegen den verschiebbaren Schenkel gebogen und den Messingröhren *d* und *d'* möglichst nahe gebracht sind. Hierdurch reduziert sich die Gesamtlänge des Apparates von 3 auf 1½ m und die Breite auf 40 cm. Abgesehen von der Bequemlichkeit der Handhabung brauchen wir während des Experiments unseren eingenommenen Platz nicht mehr zu ändern, können die in der Röhre *c a* vor sich gehenden, kleinsten Bewegungen selbst beobachten und diesem gemäß den Schenkel *d* so genau einstellen, als eben nötig ist. Trotzdem können die Interferenzerscheinungen auch auf diese Weise nur von wenigen Zuhörern zu gleicher Zeit verfolgt werden, weshalb Antolik statt der Röhre *c a* den Apparat Fig. 610 bei *c* einschaltete. Es ist eine gebogene Glasröhre, in welche bei *g* Leuchtgas eingelassen und bei *i* angezündet wird. Die hohe Flamme ist so empfindlich, dass für ihre totale Ruhe die Einstellung des Interferenzapparates zwischen den Grenzen eines Millimeters gesucht und der Ton sehr rein gewählt werden muß.

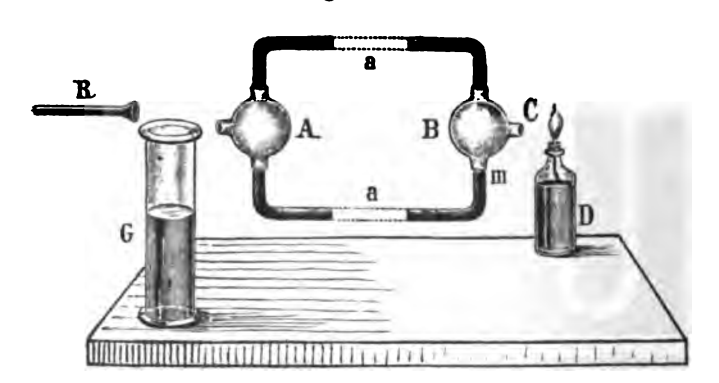
Ferner kann bei diesen Versuchen auch eine auf einem größeren Glastrichter aufgespannte Papiermembran, wenn sie bei *c* eingeschaltet und mit feinem Sande bestreut wird, sehr gute Dienste leisten. Die Klangfiguren sind ganz befriedigend, und die Empfindlichkeit der Membrane steht der der Flamme nicht nach.

Frage 1099. Welchen einfachen Apparat hat Drenteln zu demselben Zwecke konstruiert?

Antwort. Man sucht sich zwei kleine dreihalsige Kolben so aus, dass sie beim Anblasen nahezu denelben Ton erzeugen. (Nötigenfalls kann man durch Einschütten von etwas Bleischrot den Ton abgleichen). Die beiden Kolben werden durch zwei Kautschukschläuche *a a* (Fig. 611) verbunden, zu welchem Zwecke in die Kolbenhälse kleine Glasröhren mit einem Stück Kautschukschlauch eingesetzt werden. Es ist zweckmäßig, die beiden Verbindungsschläuche gleich der halben Wellenlänge des betreffenden Tones zu wählen. Gegenüber der Oeffnung des Resonators *A* wird der zur Erzeugung des Tones dienende Glaszylinder aufgestellt. Derselbe wird durch Eingießen von Wasser nach dem Tone des Apparates abgestimmt; dabei kann man auch annähernd die Wellenlänge des Tones bestimmen. Dicht an die Oeffnung des andern Resonators setzt man die Flamme eines Lämpchens (Siehe Erkl. 1018), oder man schüttet in den Hals etwas Lycopodiumsamen. Läßt man nun den Zylinder ertönen, so erlischt die Flamme, oder das Lycopodium wird herausgewirbelt, während ein anderer Ton keine Wirkung zeigt. Wenn man einen der Kautschukschläu-

Erkl. 1018. Stellt man sich ein Lämpchen her, dessen Docht mit Vaselinöl gespeist wird, so erhält man eine kleine Flamme, die leicht erlischt, wenn man das Lämpchen dicht an die Oeffnung des Resonators setzt, so dass der Docht etwa in die Mitte der Oeffnung kommt. Die Töne kann man durch Anblasen von Glaszylindern erzeugen, in welche man die nötige Menge Wasser gegossen hat; das Anblasen geschieht mittelst einer Messingröhre *R* (Fig. 611), die am Ende flach geschlagen ist. (Siehe Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht, VII, 272.)

Fig. 611.



Erkl. 1019. Wheatstone's Versuch zur Bestätigung der Bernoulli'schen Theorie, dass, wenn eine an beiden Enden offene Röhre den Grundton angibt, die Luftmengen zu beiden Seiten der Mitte der Röhre sich in entgegengesetzter Richtung zueinander bewegen, gehört auch hierher. Eine ungefähr $2\frac{1}{2}$ cm weite, 30 cm lange Röhre wurde zu einem Kreise umgebogen, so dass die offenen Enden einander nahe gegen-

überstanden; in der Mitte befand sich aber ein Gewinde, durch welches eine Drehung der Röhre in die Form eines *S* möglich wurde. Eine Klangscheibe wurde zwischen den einander zugekehrten Enden eingeschaltet, welche den Grundton angab, und es wurde in der Röhre keine Resonanz erzeugt, während diese sehr stark hervortrat, wenn die Röhre in ihrer Mitte so gedreht wurde, dass die beiden einander nun nicht mehr gegenüberstehenden Enden über Teile der Klangscheibe zu stehen kamen, welche in Beziehung auf diese entgegengesetzt, in Beziehung auf die Röhrenöffnung aber gleichartig schwangen.

che *a a* nicht dicht bei *m*, sondern in der Mitte, also in der Entfernung von ¼ Wellenlänge von *m* zusammenpreßt, dann bleibt die Wirkung bei *C* aus, weil durch Reflexion des Schalles von der zusammengepreßten Stelle mit Zeichenänderung eine Phasendifferenz von ½ Wellenlänge eintritt. Ersetzt man einen der beiden Schläuche durch einen um ½ Wellenlänge längeren, und erzeugt dann den Ton, so hat man bei *C* keine Wirkung. Wird aber der eine Schlauch um eine ganze Welle länger genommen als der andere, so erhält man bei *C* wieder eine kräftige Wirkung.

---

7. Ein Interferenzversuch mit schwingenden Saiten.

Frage 1100. In welcher Weise kann man mit Hilfe straffgespannter Seidenschnüre wie J. Puluj (Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht, II. Jahrgang, Seite 137) gezeigt hat, Interferenzercheinungen nachweisen?

Antwort. Wie in der nebenstehenden Figur 612 dargestellt ist, geht eine dünne Seidenschnur von der einen Zinke einer elektrischen Stimmgabel *A* zu einer festen Rolle *B* und über eine bewegliche Rolle C, dann über eine zweite feste Rolle zur zweiten Zinke derselben Stimmgabel zurück. Das an *C* angehängte Gewicht *P* spannt beide Seidenschnüre gleich stark. Wird daher die Stimmgabel elektrisch erregt, so teilt sich bei geeigneter Abmessung jede der beiden Schnüre in eine gleiche Anzahl gleich großer

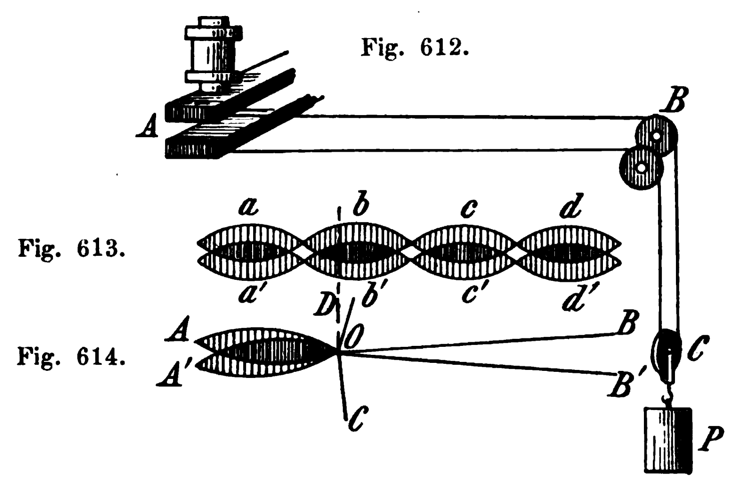


Fig. 612.

Fig. 613.

Fig. 614.

Abteilungen, von denen sowohl je zwei benachbarte, wie *a* und *b*, *c'* und *d'*, als auch je zwei gegenüberstehende, wie *a* und *a'*, *b* und *b'*, in entgegengesetzter Richtung schwingen. (Siehe Melde's Versuchsanordnung, II. Band der Akustik, Seite 38). Werden die Schnüre mit einer intermittierenden Lampe beleuchtet, so erscheinen sie als zwei Wellenzüge, die um $^1/_2$ Wellenlänge gegeneinander verschoben sind. Um nun die beiden Wellenzüge zur Interferenz zu bringen, wird ein etwa 50 cm langer Seidenfaden um die Schwingungsbäuche von je zwei gegenüberstehenden Abteilungen (wie *b* und *b'*) geschlungen und die Schlinge sanft zusammengezogen, während die Enden *C* und *D* (Fig. 614) des Fadens festgehalten werden. Die von den beiden Stimmgabelzinken *A* und *A'* ausgehenden Wellenbewegungen interferieren dann an der Schleife *O*, und es bleiben sowohl die Teile *OC* und *OD* des Fadens, als auch die Teile *O B* und *O B'* der Seidenschnur in Ruhe. Würde hingegen der Seidenfaden *C D* um den Schwingungsbauch bloß der einen Schnur *A B* locker geschlungen, so würde sich die von *A* ausgehende schwingende Bewegung auf die drei Abteilungen *O B*, *O C*, *O D* ausbreiten, und die Anzahl der Knotenpunkte auf *C D* würde von der in diesem Faden herrschenden Spannung abhängen.

Werden beide Seidenschnüre mit dem Faden *C D* an einer Knotenstelle zusammengeschnürt, so findet keine Interferenz der Wellenzüge statt, und die Bewegung pflanzt sich bei ruhig verbleibendem Faden fast ungeschwächt in den jenseitigen Teil der beiden Schnüre fort.

Anmerkung XXXIV. Ein akustisches Thermometer für hohe und niedrige Temperaturen von G. Quincke. Wiedemanns Annalen, Bd. 63, Seite 66. Diese Methode bestimmt die Temperatur einer Luftmasse durch die Schallgeschwindigkeit in dieser Luft oder durch die Wellenlänge eines Tones von konstanter Tonhöhe. Die Wellenlänge wird mit einem gewöhnlichen Millimetermaßstabe gemessen an einem sehr einfachen Interferenzapparate von ähnlicher Konstruktion, wie Quincke ihn früher (siehe Seite 316) für die Interferenz direkter und reflektierter Wellen beschrieben hat. (Poggendorffs Annalen Bd. 128. S. 190). Derselbe läßt sich aus Glas, Porzellan, Eisen, Ton oder anderem feuerfesten Materiale leicht herstellen und bequem in den Heizraum einführen. Als Tonquelle benutzt Quincke gewöhnliche Stimmgabeln auf Resonanzkästen, welche mit dem Violinbogen angestrichen werden, mit 250 bis 600 ganzen Schwingungen in der Sekunde und Wellenlängen von 1360 bis 567 mm in Luft von mittlerer Temperatur (etwa *c'* bis *e''* der temperierten Tonleiter entsprechend.)

Der Interferenzapparat besteht aus zwei geraden Röhren, der weiten Interferenzröhre und dem engen Hörrohre. Die Interferenzröhre von 40 bis 150 cm Länge und 1 bis 5 cm Durchmesser ist an einem Ende geschlossen. In dieselbe wird das an beiden Enden offene Hörrohr aus Glas oder Metall, oder feuerfestem Material von 1—2 m Länge, 4—6 mm innerem Durchmesser und 0,75—1,5 mm Wandstärke eingeschoben, dessen freies aus der Interferenzröhre hervorstehendes Ende durch einen schwarzen Kautschukschlauch von 120 cm Länge, 5 cm innerem Durchmesser und 2 mm Wandstärke mit dem Ohre des Beobachters durch Einstecken in den äußeren Gehörgang fest verbunden wird.

Das Hörrohr kann auf der Innenwand der horizontalen Interferenzröhre aufliegen oder durch aufgeschobene Dreiecke aus 1—2 mm dickem Metalldraht

in der Achse der Interferenzröhre angebracht werden. Die Enden der Drahtdreiecke werden mit Asbestschnur umwickelt, um das kratzende Geräusch beim Verschieben des Hörrohres zu vermeiden.

Man stellt das offene Ende des Resonatorkastens der tönenden Stimmgabel vor der Mündung der Interferenzröhre auf, schiebt das Hörrohr so tief als möglich in die Interferenzröhre ein, legt neben das Hörrohr eine Millimeterteilung, zieht das Hörrohr allmählich aus der Interferenzröhre heraus und liest die Verschiebung oder die Länge a der Luftsäule zwischen Boden der Interferenzröhre und Ende des Hörrohres an der Millimeterteilung ab. Die Tonstärke ist ein Maximum, Minimum, Maximum usw., wenn die Strecke a 0, 1, 2, 3 usw. Viertelwellenlängen des betreffenden Tones beträgt. Bei einiger Uebung läßt sich a bis auf 0,5—0,1 mm genau bestimmen.

Nennt man n die Schwingungszahl der Stimmgabel, $b\ b_0$ die Schallgeschwindigkeit in Luft, $l\ l_0$ die Wellenlänge des Tones, $a\ a_0$ die am Millimetermaßstabe gemessene Luftstrecke für dieselben Maxima oder Minima der Tonstärke bei t^0 und 0^0, $\alpha = 1/273$ den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Luft,

$$\text{so ist} \begin{cases} n\,l = b = b_0 \sqrt{1 + \alpha t} \\ n\,l_0 = b_0 \end{cases}$$

und daraus durch Division $\frac{a^2}{a_0^2} = \frac{l^2}{l_0^2} = \frac{b^2}{b_0^2} = 1 + \alpha t;\ t = \frac{a^2 - a_0^2}{a_0^2} \cdot 273$

$$\text{und angenähert } t = (a - a_0)\,\frac{546}{a}.$$

a_0 ist nahezu 546 mm für eine halbe Wellenlänge des Tones von 300 Schwingungen in 1 Sek. bei Zimmertemperatur. Mißt man also für diesen Ton die Verschiebung a und a_0 des Hörrohres für zwei benachbarte Minima (oder Maxima) der Tonstärke bei t und t^0_0, so gibt der in mm gemessene Unterschied $a - a_0$ direkt den Temperaturunterschied $t - t_0$ in Zentesimalgraden.

Diese Temperaturmessung setzt nur voraus, dass die Luft zwischen dem Boden der Interferenzröhre und dem Ende des Hörrohres konstante Temperatur hat. Dieselbe ist unabhängig von der Temperaturverteilung in der übrigen Luftmasse der Interferenzröhre und des Hörrohres und von dem absoluten Werte der Schallgeschwindigkeit in der Interferenzröhre oder der Schwingungszahl der benutzten Stimmgabel.

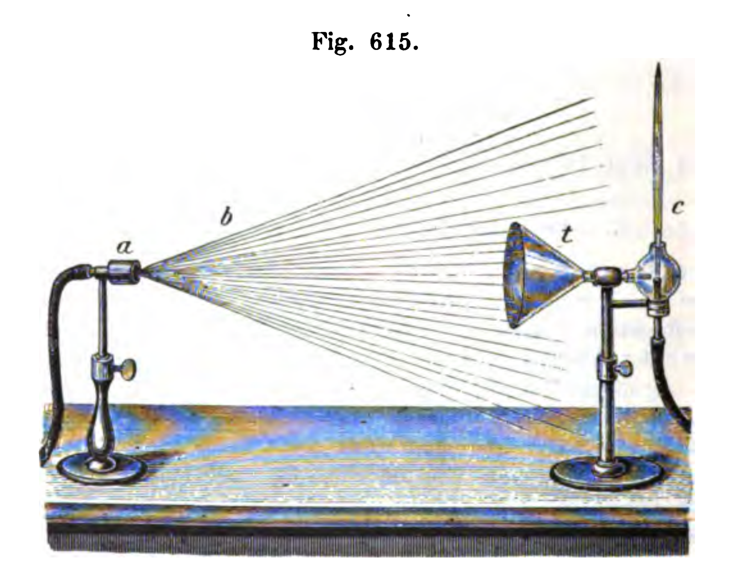
Quincke hat das im vorstehenden beschriebene Thermometer brauchbar gefunden bei Temperaturen von 100° bis 750°. Höhere Temperaturen standen ihm nicht zur Verfügung, doch dürfte es auch dafür geeignet sein.

Anmerkung XXXV. Bei Nebelsignalen an Meeresküsten (Dampfpfeifen) hat man beobachtet, dass dieselben oft auf 30 km Entfernung gehört werden, während sie zu anderen Zeiten, ohne dass eine merkliche Zustandsänderung der Atmosphäre wahrzunehmen ist, noch nicht auf 3 km Entfernung hörbar sind. Oft auch hört man das Signal nach der einen Richtung (sogar gegen den Wind) sehr weit, während es in der andern auf ganz kurze Entfernung kaum vernehmbar ist. Oft auch scheint es wie von einem Gürtel von $1\frac{1}{2}$ bis 2 km Radius umgeben, welchem der Schall vollständig fehlt.

Tyndall erklärt diese schallfreien Zonen entstanden durch Interferenz der vom Nebelsignale direkt ausgesandten Wellen mit den von der Wasserfläche reflektierten Wellen und führt zum Beweise der Richtigkeit seiner Erklärung folgende Versuche mit einem Apparate (Fig. 615) aus, den wir

schon im II. Bande der Akustik, Seite 379 kennen lernten, *a* ist eine tönende Zunge, *c* eine schallempfindliche Flamme, deren Druck so reguliert wird, dass sie zwar noch ruhig brennt, aber dem Flackern nahe ist. Zwischen den beiden die Zunge und den Trichter tragenden Ständern legt man nun ein glattes hölzernes Brett auf den Tisch und hebt dasselbe allmählich, parallel der Tischplatte, höher und immer höher. Sobald sich die von dem Brette reflektierten Wellen den direkten Wellen zugesellen, gerät die Flamme in heftige Bewegung. Wird das Brett entfernt, so beruhigt sich die Flamme, wird es wieder eingeführt, so flackert sie. Wirft man ein grobes wollenes Tuch über das Brett, während die Flamme erregt ist, so wird die Reflexion so abgeschwächt, dass die Flamme sich beruhigt. Entfernt man das Tuch, so flackert sie wieder. Hier verstärken sich die direkten und reflektierten Wellen gegenseitig. Bringen wir aber das Brett in eine größere Entfernung, bei der die reflektierten Wellen um eine halbe Wellenlänge hinter den direkten zurückbleiben, so vernichten sich

Fig. 615.



dieselben gegenseitig. Zunächst muß der Gasdruck so reguliert werden, dass die Flamme flackert, wenn die Zunge *a* ertönt. Sodann bringt man das glatte Brett vorsichtig zwischen die Zunge und die Flamme; bei einer bestimmten Höhe bewegt sich die Flamme vollständig ruhig. Wenn wir also die reflektierten Wellen mit einer passenden Verzögerung den direkten Wellen zugesellen, so vernichten wir den Schall. „Statt der Zunge wollen wir uns nun das Nebelsignal denken, statt der Flamme einen Beobachter auf dem Deck eines Schiffes, und statt unseres Brettes das glatte Meer. In einer Entfernung von der Küste, bei der die reflektierten Wellen eine halbe Wellenlänge hinter den direkten zurückbeiben, hätten wir dann genau dieselben Bedingungen, wie bei dem soeben ausgeführten Versuche; die Vereinigung der direkten und reflektierten Wellen würde also eine schallfreie Zone hervorbringen." (Der Schall von John Tyndall.)

Treffen Schallstrahlen senkrecht auf eine reflektierende Wand, so werden durch die direkten und senkrecht reflektierten Wellen zwischen Tonquelle und Wand sich stehende Wellen bilden. Schreiten die reflektierten Wellen über die Tonquelle hinaus fort, so haben sie mit den direkten Wellen gleiche

Richtung, und es kommt dann das in Antwort auf Frage 1074 gegebene Gesetz zur Geltung. Savart hat dasselbe durch den folgenden Versuch bestätigt gefunden.

In einer Entfernung von 40 bis 50 m von einer ebenen senkrechten Wand und 1,3 m über dem Boden wurde im Freien eine Glocke aufgestellt und von ihr ein gespannter Blechstreifen senkrecht gegen die Wand geführt. Die mit einem Resonanzgefäß versehene Glocke gab durch Streichen mit einem Violinbogen einen starken und gleichmäßigen Ton. Das der Tonquelle abgewandte Ohr wurde in der Richtung des Blechstreifens fortgeführt, während das zugewandte verschlossen war. Es zeigte sich, dass die Stärke des Tones in mehreren Punkten gleich Null, in den zwischenliegenden Punkten dagegen (welche, auf dem Blechstreifen markiert, eine unveränderliche Lage zeigten, so dass ihre Abstände gemessen werden konnten) ihr Maximum erreichten. Die Knoten (d. h. die Interferenzstellen der geringsten Tonstärke) ergaben sich hierbei in nahe gleichen Abständen voneinander, und dieser Abstand war gleich der Hälfte der dem Glockentone zukommenden Wellenlänge; die Bäuche (oder Stellen der größten Tonstärke) standen ebensoweit voneinander ab, und die Tonstärke nahm allmählich zu oder ab, je nachdem man sich einem Bauche näherte oder von demselben entfernte. Versuche mit höheren und tieferen Glocken, mit Orgelpfeifen und Saiteninstrumenten gaben übereinstimmende Resultate.

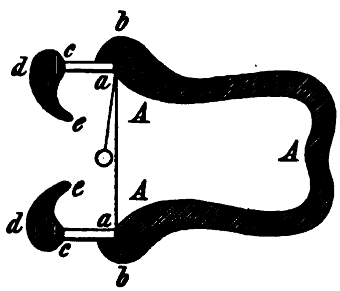
Seebeck wiederholte diese Versuche, ermittelte aber die Knoten und Bäuche nicht direkt mit dem Ohre, sondern bediente sich einer in einem Ringe ausgespannten Membran von Goldschlägerhäutchen oder sehr dünnem Kautschuk, mit einem Pendelchen, das aus einem einfachen Kokonfaden mit einem Siegellacktropfen von der Größe eines Stecknadelknopfes bestand und von dem oberen Rande bis zur Mitte der vertikal gestellten Membran herabreichte. Die Membran, auf einem schmalen Ständer befestigt, wurde mit der reflektierenden Wand parallel gestellt und konnte dieser genähert und von ihr entfernt werden. Er experimentierte zum Teil im Freien bei völliger Windstille, zum Teil, und zwar mit gleichem Erfolge, in einem großen Saale. Als reflektierende Wand diente eine sehr große und starke, vertikal aufgestellte Tischplatte und zur Hervorbringung des Tones wurde eine Glocke oder eine Stimmpfeife benutzt.

Bei diesen Versuchen ergab sich die Entfernung der Bäuche gleich einer ungeraden, und die der Knoten gleich einer geraden Anzahl von $\frac{1}{4}$ Wellenlänge. Die Verschiedenheit dieser Resultate mit denjenigen von Savart findet Seebeck dadurch herbeigeführt, dass er nicht unmittelbar mit dem Ohre, sondern mit der Membran die betreffenden Stellen bestimmte. Er vermutete, dass die direkten Wellen, welche um den Kopf des Beobachters herumgehen müssen, um zu dem der Wand zugekehrten Ohre zu gelangen, mit dieser Umbiegung ihrer Fortpflanzungsrichtung zugleich eine entsprechende Veränderung ihrer Schwingungsrichtung erleiden. Um dies zu entscheiden, experimentierte er zunächst mit der Membran, und dann mit dem in folgenden Zeilen beschriebenen Apparate, in welchem gewissermaßen der Kopf des Beobachters nachgebildet ist.

Ueber die Oeffnung eines starken Porzellangefäßes *AAA* ist eine dünne Membrann *aa* gespannt, an welcher ein paar leichte Pendelchen hängen. Auf den Umfang dieser Membran ist ein hohler Glaszylinder *caca* aufgesetzt, und bei *bb* an dem Porzellangefäße mit Wachs so befestigt, dass alle Fugen dicht zugedeckt sind. Auf den andern Rand *cc* dieses Zylinders ist eine Art Trichter *ddee* aufgesetzt, welcher ebenfalls aus Wachs gebildet ist. Der Schall kann zu

der Membran nur durch den Trichter gelangen, und ist dieser gegen die Wand gekehrt, so muß der direkte Schall erst an dem Gefäße vorbeigehen und dann bei *dd* umgebogen werden; der zurückgeworfene Schall dagegen tritt geradezu


Fig. 616.



in den Trichter. Beide Wellenzüge müssen in diesem Falle ebenfalls interferieren. Die Versuche mit diesem Apparate ergaben, dass die Knoten jetzt da liegen, wo vorher die Bäuche lagen, und umgekehrt.

---

b) Schwebungen.

Frage 1101. Was versteht man in der Akustik unter S c h w e b u n g e n und S t ö ß e n?

Erkl. 1020. Während wir in dem vorigen Abschnitte die Erscheinungen des Zusammentreffens zweier Wellenzüge g l e i c h h o h e r Töne betrachtet haben, handelt es sich bei den S c h w e b u n g e n um das Zusammentreffen zweier Wellenzüge von v e r s c h i e d e n h o h e n Tönen, also von v e r s c h i e d e n e r L ä n g e. Zwei derartige Wellen sind in ihren Schwingungen bald gleich, bald entgegengesetzt gerichtet, weshalb das Ohr eines Beobachters abwechselnd die Summe oder die Differenz der Impulse der einzelnen Wellen erhält, je nachdem zugleich die Wellenberge oder die Wellentäler zusammen das Ohr treffen, oder ein Wellenberg mit einem Wellentale zusammentrifft. Die Schwebungen folgen um so schneller aufeinander, je mehr sich die Töne der beiden Tonquellen voneinander unterscheiden.

Antwort. Wenn man von zwei im Einklange stehenden Tonquellen (Stimmgabeln, Saiten oder Pfeifen) die eine nur s e h r w e n i g v e r s t i m m t und dann beide g l e i c h z e i t i g zum Tönen anregt, so läßt sich ein allmähliches und regelmäßiges S t ä r k e r- u n d S c h w ä c h e r w e r d e n des Zusammenklanges vernehmen. Dieses periodische, regelmäßige Schwanken der Tonstärke heißt das „S c h w e b e n" oder die „S c h w e b u n g" der Töne. Die größte Tonstärke dieser Schwebungen oder jede dabei stattfindende einzelne Schwellung der Tonintensität wird ein S t o ß oder S c h l a g genannt, während die geringsten Tonintensitäten als P a u s e n bezeichnet werden, da sie häufig bis zum Verlöschen des Tones gehen.

Frage 1102. Wie kann man sich durch zwei nicht ganz isochron schwingende P e n d e l recht deut-

Antwort. Wir benutzen zu diesem Zwecke zwei Sekundenpendel

lich zur Anschauung bringen, wie bei zwei nicht ganz isochronen Tönen bald Verdichtung mit Verdichtung und Verdünnung mit Verdünnung, bald wieder Verdichtung mit Verdünnung zusammentreffen?

Erkl. 1021. Die Schwebungen gehören zu den recht häufig auftretenden Erscheinungen. So zeigen sie sich namentlich sehr auffallend beim Läuten großer Turmglocken, da es nicht möglich ist, eine große Glocke in der Art zu gießen, dass sie in allen ihren Teilen gleiche Dichte und Elastizität besitzt. Die Glocke teilt sich daher leicht in nicht vollkommen gleichartige Stücke, welche etwas verschieden schwingen, und somit die Schwebungen erzeugen. Ferner nimmt man Schwebungen wahr bei Glasröhren, langen Metallstäben oder silbernen Löffeln, wenn man sie an einem Ende herabhängen läßt und mit den Fingern die Enden des Fadens ins Ohr bringt. (Siehe I. Band der Akustik, Seite 106.) Auch bei Orgeln hört man derartige Schwebungen sehr häufig, und sie geben ein einfaches Mittel an die Hand, um zwei unter sich wenig verschiedene Töne in Einklang zu bringen. Zu diesem Zwecke braucht man nur so lange zu stimmen, bis die Schwebungen aufhören. Liegen die Stöße einander sehr nahe, wie z. B. bei tiefen verschieden gestimmten Tönen, namentlich der Orgelpfeifen, so erzeugen sie ein widerliches Gerassel, ein unangenehmes Geräusch, und hieraus wird das sogenannte Schlagen der Töne zweier Instrumente und der Umstand erklärlich, dass es auf vielen Violoncellos einen Ton gibt, welcher nicht zum reinen Klange gebracht werden kann, weil die Schwingungen der Saite mit denen des oberen Resonanzdeckels so zusammenfallen, dass einander sehr nahe liegende Stöße erzeugt werden.

mit hörbarem Schlage (so wie sie als Nebenapparate zur Atwood'schen Fallmaschine geliefert werden), und stellen die Pendellinsen so, dass das eine Pendel in der Minute 60, das andere 59 Schläge macht. Wir lassen beide ihre Schläge gleichzeitig beginnen. Anfänglich fallen die Schläge zusammen und geben einen doppelt so starken Schlag. Allmählich gehen die Schläge aber immer mehr auseinander und werden schwächer; nach Verlauf einer halben Minute sind sie am weitesten auseinander, also am schwächsten zu hören.

Dann nähern sie sich wieder, immer stärker, und am Ende der Minute bringen sie nochmals einen doppelt so starken Schlag hervor. In den folgenden Minuten wiederholt sich derselbe Vorgang, und in ähnlicher Weise muß es auch bei den Schwingungen tönender Körper sein. Macht z. B. der erste Ton 100, der zweite aber 101 Schwingungen in der Sekunde, so werden, wenn wir sie zusammen erklingen lassen, die ersten Schwingungen des einen und des andern Tones fast gleichzeitig erfolgen, ihre Wirkungen werden sich somit summieren und einen stärkeren Ton hervorbringen. Aber der 50. Schwingung des ersten Tones entsprechen $50\frac{1}{2}$ des zweiten, so dass in diesem Momente die Schallwellen in entgegengesetzten Richtungen zusammentreffen, d. h. es trifft eine Verdichtung (oder ein Wellenberg) mit einer Verdünnung (oder einem Wellentale) zusammen, und man wird daher einen kaum hörbaren Ton erhalten. Der 100. Schwingung des ersten Tones entspricht die 101. des zweiten Tonerregers, und folglich werden sich die Wirkungen wiederum summieren müssen.

Frage 1103. Welches Gesetz bezüglich der Zahl der Schwebungen (oder der Geschwindigeit der Stöße) läßt sich aus der vorstehenden Antwort ableiten?

Erkl. 1022. Hällström entwickelt die nebenstehende Gleichung in folgender Weise: In der Zeit $1/x$ entsteht ein Stoß, und in dieser Zeit macht der Ton mit der Schwingungszahl r, r/x, der andere Ton s/x Schwingungen. In derselben Zeit aber, in welcher durch das Zusammenwirken der Schwingungen ein Stoß entsteht, muß der höhere Ton eine Schwingung mehr vollführen, oder es muß $s/x - r/x = 1$, also $s - r = x$ sein. Ist z. B. $r = 430$, $s = 435$, so entsteht in $^1/_5$ Sekunde ein Stoß, denn in dieser Zeit macht der erste Ton 430/5 oder 86, der zweite 435/5 oder 87 Schwingungen.

Antwort. Aus der vorstehenden Antwort ersieht man, dass für jeden Unterschied von einer Schwingung in der Sekunde eine Schwebung entsteht. Wenn wir daher zwei Töne haben, die in der Sekunde um 2, 3, 5 oder 10 oder n Schwingungen voneinander abweichen, so müssen wir auch 2, 3, 5 oder 10 oder n Schwebungen in der Sekunde erhalten. Die Zahl der Schwebungen ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Töne. Sind r und s die Schwingungen der angestimmten Töne in der Sekunde und x die Anzahl der Stöße, so ist $x = s - r$. (Siehe Erkl. 1022.)

Frage 1104. In welcher Weise hat der Orgelbauer F. Lange (im Jahre 1857 zu Berlin) nachgewiesen, dass die Stöße nicht nur im Ohre durch Zusammentreffen der einzelnen Impulse entstehen, sondern dass sie objektiver Natur sind, d. h., dass an den Interferenzstellen die den Stoß erzeugenden Impulse sich tatsächlich zu größeren Schwingungen summieren?

Erkl. 1023. Außer bei musikalischen Tönen kann man auch in Geräuschen die Wirkung der Interferenz wahrnehmen. Zwei Pendel oder Metronome gehen selten so genau zusammen, dass nicht Wechsel zwischen Voreilen und Zusammentreffen der Schläge stattfänden. Der Trab eines Pferdepaares bietet eine ähnliche Erscheinung, indem beim Zusammentreffen ihrer Schritte Verstärkungen entstehen. Dass auch einzelne Körper Schwebungen geben können, kann man an fazettierten Trinkgläsern zeigen, wenn man deren Rand mit einem gut beharzten Violinbogen streicht. (S. Erkl. 1021.)

Antwort. Lange brachte in den Fuß einer Zungenpfeife mit gläserner Wand zwei Rohrwerke und setzte auf jedes eine Pfeife, so dass er zwei Zungenpfeifen erhielt, die durch denselben Luftstrom angeblasen wurden. Die Pfeifen wurden nahe gleich gestimmt, so dass die Stöße sich sehr langsam folgten. Bei Betrachtung der Zungen sieht man dann, wie der Weg derselben bei jedem Stoße um vieles bedeutender ist als sonst.

Frage 1105. Wie kann man sich durch eine graphische Darstellung das abwechselnde Anschwellen und Abnehmen eines Tones beim Zusammenwirken zweier Wellensysteme anschaulich machen?

Antwort. In Figur 617 stellen die beiden schwach gezeichneten Kurven die Wellen der beiden nicht isochronen Töne vor. Die Wellenberge entsprechen den Luftverdichtungen, die Wellentäler den Verdünnungen. Verfahren wir nun wieder so, wie es bei den Figuren 524 bis 529 angedeutet wurde, dass wir die Entfernungen der beiden Kurven von einer angenommenen Mittellinie (oder ihre Ordinaten) addieren, resp. subtrahieren, so erhalten wir für jeden Moment die Größe der Verdünnung, mit welcher beide Wellen zusammen das Ohr treffen; auf diese Weise ist die stark gezogene Kurve konstruiert, welche bei *a*, *b*, *c*, *f*, *g*, *h*, durch verstärkte Verdichtungen und Verdünnungen ein Anschwellen des Tones markiert, während sich in der Mitte die Wellen fast gänzlich aufheben, was einem Schwächerwerden des Tones entspricht. (Siehe auch Fig. 530).

Eig. 617.



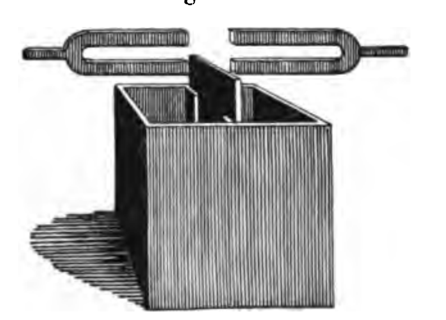
Erkl. 1024. Schwebungen, die einander in größeren Zwischenräumen als in einer Sekunde folgen, machen den Eindruck eines ruhigen Wogens, eines langsam wechselnden Crescendo und Decrescendo. Die Wirkung auf die Gehörsnerven ist keine unangenehme, auch dann nicht, wenn die Zahl der Schwebungen 3 oder 4 in der Sekunde beträgt und dieselben schon mehr den Charakter getrennter Stöße annehmen. Wächst aber die Differenz der beiden Töne bis zu einem Halbtone, also die Zahl der Schwebungen bis auf 20 oder 30 in der Sekunde, so wirken die Tonstöße von dem Augenblicke an, wo wir sie nicht mehr zu zählen vermögen, unangenehm rauh und knarrend auf unser Gehör. Diese Wirkung beruht auf Tonunterbrechung oder I n t e r m i t t e n z. Aus diesem Grunde wirkt der Ton eines S i g n a l p f e i f c h e n s, in welchem eine Erbse eingeschlossen ist, viel schriller, als wenn die Erbse entfernt wird. Solche Gehörseindrücke sind für das Ohr ebenso unangenehm, wie das Flackern eines Lichtes für das Auge. oder das Kitzeln für die Haut.

Frage 1106. Wie läßt sich nachweisen, dass auch eine einheitliche, abgeschlossene Luftmasse in so ungleiche Schwingun-

Antwort. Werden über einem, durch einen Schieber geteilten Klangkästchen (Fig. 618) dessen

gen geraten kann, dass dadurch Schwebungen entstehen?

Fig. 618.



eine Abteilung z. B. auf 870 und die andere auf 864 Schwingungen abgestimmt ist, zwei tönende Stimmgabeln von genau denselben Schwingungszahlen gehalten, so werden die hierdurch entstehenden Schwebungen auch dann fortdauern, wenn durch Hinwegnahme des Schiebers die Luftmassen beider Kästchen in eine scheinbar einzige Masse zusammenfließen, die als Resonator der Gabeltöne nicht geeignet sein würde.

Frage 1107. Wie lassen sich Schwebungen mittelst zweier Orgelpfeifen vorführen?

Erkl. 1025. Am besten beobachtet man die Schwebungen, wenn man zwei einfache Töne von gleicher Höhe durch gedeckte Orgelpfeifen nebeneinander hervorbringt und langsam die Stimmung der einen dadurch verändert, dass man den beweglichen Deckel tiefer hineinschiebt und dadurch die Pfeife höher macht, oder den Deckel herauszieht, wobei sie tiefer wird.

„Wenn man in solcher Weise zuerst eine kleine Differenz der Töne hervorbringt, so hört man die Schwebungen erst wie lang hinziehende Tonwellen abwechselnd fallen und wieder sich heben. Dergleichen langsame Schwebungen können bei der Ausführung einer in langgetragenen Akkorden hinziehenden Musik etwas sehr feierliches haben, oder auch einen etwas bewegteren, gleichsam zitternden oder erschütternden Ausdruck geben. Daher findet man wohl an neueren Orgeln oder Harmoniums ein Register mit je zwei Zungen oder Pfeifen, welche Schwebungen geben. Man ahmt dadurch das Tremolieren der menschlichen Stimme und der Geigen nach, welches, passend an einzelnen Stellen gebraucht, sehr ausdrucksvoll und wirksam sein kann, aber eine abscheuliche Unart ist, wenn es fortdauernd angewendet wird, wie es leider oft genug geschieht.“ (Helmholtz.)

Antwort. Wenn wir zwei ganz gleich große und ganz gleich gestimmte Orgelpfeifen zu gleicher Zeit ertönen lassen, so erhalten wir denselben Ton von größerer Stärke, als wenn eine Pfeife allein klingt. Wenn wir nun aber durch Herabziehen eines beweglichen Schiebers (der sich zu diesem Zwecke oben an der Pfeife befindet) diese Pfeife etwas verkürzen und hierdurch ihren Ton ein wenig erhöhen, oder wenn wir durch Anhalten des Fingers an das Windloch der einen Pfeife deren Ton etwas vertiefen, so vernehmen wir jetzt beim Zusammentönen beider Pfeifen einen Ton von auf- und abschwankender Intensität, bald stark, bald schwach, d. h. wir vernehmen ganz deutliche Schwebungen, deren Zahl um so größer wird, je größer wir die Höhendifferenz der beiden Töne machen.

Mit Hilfe der Schwebungen stimmen auch die Orgelstimmer die Pfeifen ab. Die einzelnen Stöße entfernen sich um so mehr voneinander, je mehr die Töne der Pfeifen übereinstimmen.

Frage 1108. Wie können die Schwebungen zweier Orgelpfeifen nicht nur für das Ohr, sondern auch für das Auge wahrnehmbar gemacht werden?

Antwort. Die Schwebungen zweier nahezu gleich gestimmten Orgelpfeifen lassen sich sichtbar darstellen, indem man ein und denselben Gasstrom nacheinander durch die manometrischen Kapseln beider Pfeifen (siehe Fig. 592) zu einem gemeinsamen Brenner führt. Im rotierenden Spiegel zeigt sich dann eine Reihe von Flammenbildern von ab- und zunehmender Höhe.

Wirken beide Töne zugleich auf dieselbe Flamme, so zeigt diese bei den Stößen noch viel stärkere Zuckungen, als es die zwei Flammen taten, da sie bei den letzteren durch direkt erregte und influenzierte, also ungleich starke Schwingungen in derselben Luftsäule, hier dagegen durch direkt in zwei gleichen Luftsäulen hervorgerufene und also nahezu gleich starke Töne gebildet werden.

Erkl. 1026. Nähert man die beiden Töne allmählich dem Einklange, so bemerkt man, dass man hier die Schwebungen nicht wie bei den Stimmgabeln, nach Belieben verlangsamen kann, sondern bei einer gewissen Grenze verschwinden sie plötzlich, und die beiden Luftsäulen schwingen wie ein System, d. h. wie zwei etwas ungleich gestimmte Körper, die so innig miteinander verbunden sind und daher gegenseitig so stark aufeinander wirken, dass keiner von beiden seinen Eigenton ungestört hervorbringen kann, was dann zur Folge hat, dass nur ein einziger, zwischen beiden liegender Mittelton entsteht. Dieser Ton ist stärker als der einer einzelnen Orgelpfeife, und die Flamme zeigt dabei in ihrem Innern in der Mitte eine leuchtende Verengung, welche sich über einen nichtleuchtenden, blauen, breiteren Rand erhebt.

Frage 1109. Wie läßt sich mit Hilfe zweier Orgelpfeifen nachweisen, dass Schwebungen von je zwei einfachen Tönen nicht nur dann entstehen, wenn ihre Schwingungszahlen wenig voneinander entfernt sind, sondern auch dann, wenn diese Schwingungzahlen nahezu in einem einfachen Verhältnisse (z. B. 1 : 2) zu einander stehen?

Antwort. Wir nehmen zwei Pfeifen, welche den Grundton und seine Oktave geben und deren Tonhöhe sich leicht abändern läßt. Sind beide gleich 1 : 2 gestimmt und lassen wir sie zusammen ertönen, so geben sie keine Schwebungen und der Zusammenklang ist ein angenehmer, gleichsam ein einziger mehr heller und voller Ton. Aber sobald wir einen der Töne nur wenig abändern, hören wir sogleich die den Zusammenklang störenden Schwebungen.

Auch in diesem Falle geben die Schwebungen das einfachste und sicherste Mittel, um nachzuweisen, dass zwei Töne nicht so abgestimmt sind, dass ihre Schwingungen durch einfache Zahlenver-

Erkl. 1027. Zur Demonstration der Schwebungen gebraucht man auch mit Vorteil die von Lord Rayleigh entdeckte Wirkung einer Resonanzkugel auf eine vor der engen Oeffnung derselben befindliche Kerzenflamme. (Siehe Fig. 455.) In einer Entfernung von 2 bis 3 m von einem Resonator, dessen Grundton z. B. $\bar{c}$ ist, wird eine gut ansprechende Labialpfeife von demselben

Grundtone aufgestellt. Der aus der engen Röhre der Kugel austretende Zugwind ist immer noch sehr gut au der Kerzenflamme bemerkbar; am Munde des Resonators ist der Zug noch so stark, dass man ihn direkt fühlt, wenn man, falls der Pfeifenton ein wenig zu niedrig ist, den Resonator mit der Hand richtig stimmt.

Mit zwei Pfeifen von demselben Grundtone wird der Versuch auffallender und wenn eine derselben verstimmt wird, so zeigen sich die Schwebungen deutlich an den rhythmischen Bewegungen der Flamme. Auch mit Hilfe zweier singenden Flammen erhält man intensive Schwebungen.

hältnisse sich ausdrücken lassen. Weil nun diese einfachen Verhältnisse eine notwendige Bedingung sind, um für das Ohr angenehme Akkorde zu erzeugen, so sind etwa vorhandene Schwebungen ein sicherer Beweis dafür, dass die Instrumente nicht gut gestimmt sind.

Frage 1110. Wie lassen sich Schwebungen unter Benutzung von Stimmgabeln vorführen?

Erkl. 1028. Man kann auch (nach Lissajous und Desains Angabe) mittelst zweier übereinander angeordneter und parallel voneinander sich verschiebender Stimmgabeln (Fig. 531) die den Schwebungen entsprechenden Interferenzfiguren auf einen berußten Glasstreifen zeichnen lassen und sie mittelst eines Skioptikons auf einen weißen Schirm projizieren. Die Figur 532 zeigt (besonders in den ersten sieben Reihen) die auf solche Weise entstandenen Kurven.

Antwort. Hat man zwei Stimmgabeln, welche auf Resonanzkästchen aufgesetzt sind und sich vollkommen im Einklang befinden, nebeneinander gestellt, so braucht man nur die eine mit etwas Wachs (oder noch besser mit einem schmalen, von einem Gummischlauche abgeschnittenen Ringe, den man über die eine Zinke schiebt) zu belasten, um die Stöße sehr deutlich hörbar zu machen, wenn man beide Stimmgabeln durch Anstreichen mit dem Geigenbogen gleichzeitig zum Tönen bringt.

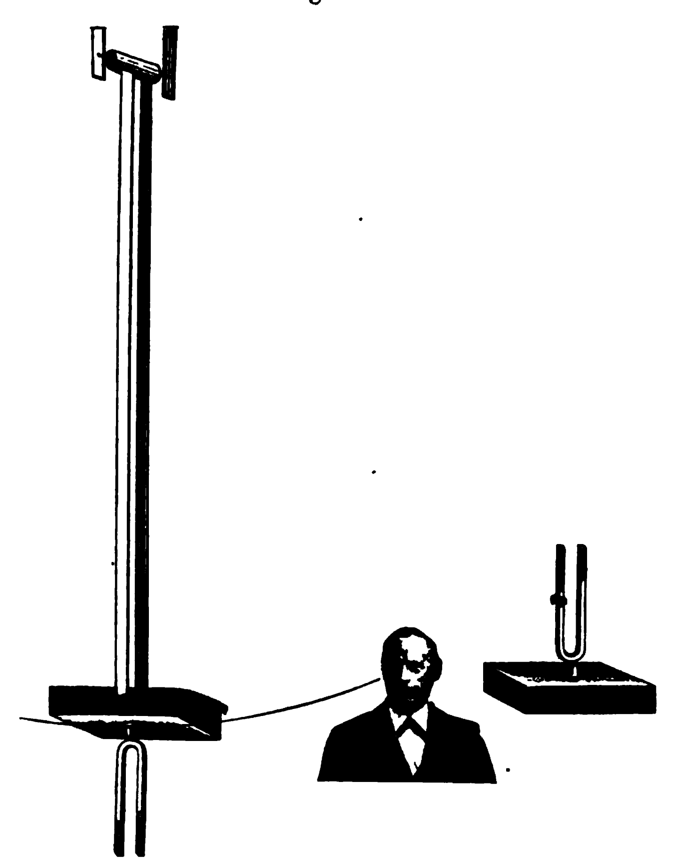
Frage 1111. In welcher Weise lassen sich Schwebungen hervorrufen durch zwei Schallquellen, deren eine feststeht, während die andere in der Richtung von und zu unserem Ohre bewegt wird?

Erkl. 1029. Nimmt man eine Stimmgabel mit dicken Zinken, welche einen recht kräftigen und hohen Ton von über 2000 Schwingungen per Sekunde gibt

Antwort. Letzteres bewirkt man am bequemsten, wenn man eine mit Resonanzkästchen verbundene Stimmgabel als Pendel aufhängt und schwingen läßt. Diesem Pendel gegenüber stellt man sich auf kurze Entfernung mit einer zweiten Stimmgabel auf (Fig. 619). Man kann nun den Versuch in

und bewegt dieselbe, nahe der Zimmerwand stehend, senkrecht gegen dieselbe hin und zurück, so hört man ebenfalls sehr deutliche Schwebungen zwischen dem direkten und dem reflektierten Tone. Um die Schwebungen dem Auge sichtbar zu machen, kann man die früher beschriebene optische Methode mittelst der Spiegel tragenden Stimmgabeln anwenden.

Fig. 619.



zweierlei Weise ausführen, je nachdem die beiden Gabeln entweder genau im Einklang sich befinden, oder um einige Schwingungen differieren. Im letzteren Falle werden, wenn beide Gabeln im ruhenden Zustande n Schwebungen machen, bei der Entfernung weniger, dagegen bei der Näherung mehr als n Stöße gehört werden. Sind hingegen beide Gabeln gleichgestimmt, so wird sowohl bei der Annäherung wie bei der Entfernung der pendelnden Gabel die gleiche Zahl von Schwebungen vernommen, die beim Nahen durch Vermehrung, beim Entfernen durch Verminderung der Schwingungszahl entstehen.

Frage 1112. Wie läßt sich zeigen, dass das Ohr für einen intermittierenden Reiz empfindlicher ist, als für den glatten Abfluß desselben Reizes?

Antwort. Man kann das durch eine Stimmgabel beweisen, deren Ton, wenn er scheinbar schon völlig verschwunden ist, wieder gehört wird, sobald man die Gabel rasch um ihre Achse dreht, weil durch die Interferenz Unterbrechungen des Tonflusses entstehen. Ebenso läßt sich das Vorhandensein äußerst schwacher Töne wahrnehmen, wenn man einen zweiten gleich schwachen Ton hinzubringt, der mit jenem zählbare Schwebungen macht. Zu diesem Versuche eignet sich eine Stimmgabel, neben welcher man, sobald ihre Schwingungsweiten bis zur Unhörbarkeit klein geworden sind, eine etwas höher oder tiefer gestimmte Gabel leise ertönen läßt. Die entstehenden Schwebungen beweisen, dass die Schwingungen der ersten Gabel, obgleich unhörbar geworden, noch fortdauerten.

Erkl. 1030. Schwebungen erhält man auch bei einem durch zwei Saiten erzeugten tiefen Tone eines Klaviers, wenn man die eine Saite absichtlich so weit tiefer stimmt, dass das Ohr den Ton jeder einzelnen als unmerklich verschieden erkennt. Werden dann beide gleichzeitig durch die nämliche Taste angeschlagen, so hört man deutlich das wellenartige Wachsen und Abnehmen und das von beiden reflektierte Sonnenlich zeigt sie gekräuselt, statt dass sie gleichstimmend als blanke Flächen erscheinen.

Frage 1113. Wie lassen sich die Erscheinungen der Stöße oder Schwebungen mit Hilfe der H e l m h o l t z'schen D o p p e l s i r e n e zeigen und damit zugleich das (in Antwort auf Frage 1102 gegebene) Differenz-Gesetz beweisen?

Antwort. Zu diesem Behufe öffnet man an beiden Sirenen zwei gleichzahlige Lochreihen, z. B. jene mit 12 Löchern, und verstimmt den einen Ton ein wenig, indem man die Kurbel langsam aber konstant und damit zugleich den oberen Windkasten so um seine Achse dreht, dass seine Rotationsrichtung jener der Scheibe e n t g e g e n g e s e t z t ist. Da hierbei die Löcher der festen Deckplatte jenen in der Drehscheibe e n t g e g e n k o m m e n, so fallen sie f r ü h e r aufeinander, als wenn beide Windkästen ruhen. Der Ton der oberen Sirene wird also etwas h ö h e r als jener der unteren, und weil bei dieser Drehung der oberen Sirene dieselbe durch jene vier Stellungen geht (Antwort auf Frage 1087), bei welchen der Sirenenklang abwech-

Erkl. 1031. Wendet man bei der Doppelsirene, während man die Schwebungen erzeugt, die zylindrischen Resonatoren *c h* (Fig. 598) an, so sind die Stöße viel deutlicher als ohne dieselben. Im letzteren Falle stören die ebenfalls miteinander Schwebungen gebenden Obertöne durch ihre Stärke die richtige Wahrnehmung der Aenderungen in der T o n i n t e n s i t ä t; dafür treten aber die Aenderungen der T o n h ö h e und K l a n g f a r b e auffallender hervor.

Erkl. 1032. Auch die Stöße, welche bei größeren Intervallen durch die Obertöne auftreten, lassen sich mit der Dop-

pelsirene demonstrieren. Man läßt z. B. an der oberen Scheibe 12, an der unteren 18 Löcher wirken, das Intervall ist 2 : 3, also die Quinte. Dieselbe ertönt rein und ohne Stöße, so lange man die Kurbel unberührt läßt, dreht man sie aber, so gibt jede Umdrehung derselben 12 Stöße, woraus folgt, dass dieselben durch Interferenz des zweiten Obertones des tieferen, mit dem ersten Obertone des höheren Tones entstehen. Angenommen, der Ton der Zwölferreihe entstehe durch 220, der der Achtzehnlöcherreihe durch 330 Schwingungen. Der zweite Oberton des ersten beträgt daher 3 . 220 = 660, der erste Oberton des zweiten ebenfalls 2 . 330 = 660 Schwingungen, welche zusammen keine Stöße geben können. Erhöht man aber den Ton 220 durch eine Drehung der Kurbel pro Sekunde auf 224, so wird sein zweiter Oberton 3 . 224 = 672, welcher mit dem Tone 660 eine Anzahl von 672—660 oder 12 Schwebungen geben muß.

selnd stärker und schwächer wird, so treten Schwebungen auf, und zwar bei je einer vollen Umdrehung (360°) der Kurbel vier, die Scheiben mögen beliebig rasch rotieren, die Töne also beliebig hoch sein.

So oft die Kurbel 90° gedreht wird, ergibt sich eine Differenz von einer Schwingung für beide Grundtöne der Sirene (weil die zugehörige Drehung des Kastens $^1/_{12}$ der Peripherie entspricht), und gleichzeitig tritt ein Stoß auf; bei einer Rotation der Kurbel um n rechte Winkel tritt demnach eine Differenz von n Schwingungen auf, und zugleich werden n Stöße gehört, woraus das erwähnte Differenz-Gesetz für die Stöße folgt.

Frage 1114. Inwiefern wird es auch einem musikalisch völlig ungebildeten Ohre möglich, mittelst der Stöße das Stimmen musikalischer Instrumente vorzunehmen?

Erkl. 1033. Schon Sauveur hat die Stöße angewandt, um die absolute Schwingungszahl der Töne zu ermitteln, und zwar zu einer Zeit, zu welcher man weder die Gesetze der Schwingungen der Saiten, noch die der Schwingungen der Stäbe kannte, indem er sich tönender Röhren bediente. Nehmen wir an, dass wir drei Röhren so in Einklang bringen, dass die erste mit der zweiten die Terz *C-E* und mit der dritten die kleinere Terz *C-Es* gebe, dann ist die Anzahl der Schwingungen von *C* gleich 1 oder 20/20, die von *E* gleich 5/4 oder 25/20 und die von *Es* gleich 5/4 mal 24/25 oder 24/20. Läßt man nun zugleich *E* und *Es* tönen, so hört man sehr deutliche Stöße in Zwischenräu-

Antwort. Unterscheiden sich zwei Töne durch eine bestimmte Anzahl, z. B. um 4 Schwingungen in der Sekunde voneinander, so bleibt die Anzahl der Stöße dieselbe, so lange diese Tondifferenz andauert. Wir denken uns jetzt zu jedem Tone der chromatischen Tonleiter eine Stimmgabel, welche aber um etwas höher oder tiefer als der entsprechende Ton gestimmt ist, derart, dass sie mit dem vollkommen reinen Tone eine gewisse Anzahl von Stößen, z. B. vier pro Stunde, gibt. Wenn wir jetzt irgend ein Instrument stimmen wollen, so muß der zu regulierende Ton mit der für ihn bestimmten Gabel in der Sekunde genau vier Stöße erzeugen. Um nun zu erfahren, ob der zu regulierende Ton höher oder tiefer als der Stimmgabelton liegt, gibt es zwei Wege:

men, so dass man sie mehrere Minuten lang zählen kann. Gesetzt, man zähle 480 in 2 Minuten, so gibt dies 4 Schläge in einer Sekunde. Da nun zu einer Begegnung 25 Schwingungen von *E* und 24 Schwingungen von *Es* nötig sind, so macht *E* 100 Schwingungen in einer Sekunde und *Es* nur 96, folglich *C* deren nur 80. In dieser Voraussetzung sind dieses die Schwingungszahlen, welche diesen Tönen entsprechen; man braucht folglich nur die Stelle zu kennen, welche dieselben in der Tonleiter einnehmen, um daraus alsdann die absoluten Schwingungszahlen aller Töne abzuleiten.

Erkl. 1034. Scheiblers Stimmapparat bestand zunächst aus einer Reihe von 13 Normalstimmgabeln, welche von *a'* bis *a''* nach der üblichen temperierten chromatischen Tonleiter fortschreiten, ferner aus einer Reihe gewöhnlicher Stimmgabeln (Hilfsgabeln) um vier Stöße tiefer gestimmt, als der gesuchte Ton.

Scheiblers Tonmesser enthielt 56 Gabeln, welche von *a* bis *a'* so fortschritten, dass je eine vorhergehende mit der nachfolgenden vier Stöße in der Sekunde gab. Die Summe aller dieser Stöße ist gleich dem Unterschiede der doppelten Schwingungszahlen von *a* und *a'* und gleich der Schwingungszahl von *a*, da diese gerade die Hälfte der Schwingungen des *a'* (von 440 Schw.) beträgt.

König hat einen großen Tonmesser konstruiert, der das Intervall von 16 bis 32 000 Schwingungen und somit die ganze Skala der wahrnehmbaren Töne umfasst. Von 16 bis 256 Schwingungen genügen acht Stimmgabeln mit Laufgewicht, von denen jede 32 verschiedene Töne liefert. Die Gabel G_{-1} hatte Zinken von 35 mm Dicke, 55 mm Breite und 75 cm Länge. Die fünf ersten Gabeln wogen 130 kg. Für die höchste Oktave hat man statt der Stimmgabeln gerade Stäbe genommen, deren kleinster c^8 mit 32 768 Schwin-

a) Man verschafft sich für jeden Ton z w e i Gabeln, eine etwas tiefere und eine etwas höhere als der gesuchte Ton. Beide Gabeln müssen von dem letzteren um eine gleiche Anzahl von Schwingungen abstehen. Jeder fragliche Ton wird dann mit jeder dieser zwei Gabeln genau die gleiche Anzahl von Stößen in der bestimmten Zeit geben.

b) Es ist für jeden Ton nur eine Gabel vorhanden, aber man weiß, ob dieser Ton der leitenden Gabel t i e f e r oder h ö h e r als der zugehörige Ton der Skala ist. Man ruft nun mittelst des zu stimmenden Tones und der zugehörigen Gabel die entsprechende Anzahl von Stößen hervor. Hierauf werden die entgegengesetzt liegenden Stöße aufgesucht, und aus den dabei notwendigen Operationen an dem zu stimmenden Instrumente, z. B., ob es, um die zweite Art der Stöße hervorzurufen, notwendig ist, die Saite mehr nachzulassen oder zu spannen, wird man mit Rücksicht auf die Höhe der leitenden Gabel schließen, welcher von beiden Tönen bei gleich viel Stößen der richtige ist.

Auf diese Weise ist es Scheibler gelungen, das Stimmen auf ein g e w ö h n l i c h e s H ö r e n v o n S c h l ä g e n zurückzuführen, wozu es keiner besonderen Gehörsbildung und keiner eignen Uebung bedarf. Eine Stimmgabel gibt z. B. *a'* an, Scheibler stellt dann eine Stimmgabel her, die einen etwas tieferen Ton hat und mit der a'-Gabel genau vier Stöße in der Sekunde gibt. Um nun die Saite eines Monochords genau auf *a'* zu stimmen, wird sie mit der tieferen Gabel verglichen und so gespannt, dass sie mit derselben vier Stöße gibt. Der Ton der Saite ist dann genau das eingestrichene *a*. (Siehe Erkl. 1033).

gungen selbst keinen hörbaren Ton mehr gibt; man kann mit ihm die Stimmgabeln anschlagen, ohne dabei noch seinen Eigenton zu hören.

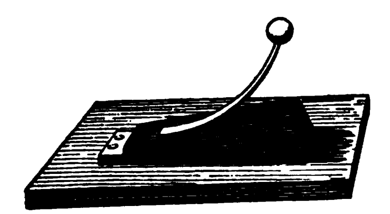
Frage 1115. Was versteht man unter Pseudoschwebungen?

Erkl. 1035. Tremulieren, vom italienischen tremolando, heißt „beben, bebend"; Tremolation, d. i. zitternde Bewegung, bezeichnet beim Singen eine bald ermüdende Manier, bei Streichinstrumenten einen höchst wirksamen Effekt, sowie auf dem Klavier das den Ton zu höchster Fülle steigernde Trommeln.

Antwort. Darunter versteht man die zitternde oder bebende Bewegung der Stimme beim Gesang, sowie die schnell wiederholte Angabe derselben Töne auf Streich- und Blasinstrumenten, auf Zithern und Guitarren, oder einander schnell folgende Verstärkungen des Tones (das sog. „Tremolieren"). Da diese Erscheinung durch schnell wiederholten Wechsel in der Tonstärke eines Tones oder durch trillerartigen Wechsel zweier Intervalle unter Halbtongröße hervorgebracht wird, also duch zwei Klänge entsteht, die immer nur nacheinander und nie zugleich ertönen, so können dieselben auch nicht interferieren, daher auch keine echten Schwebungen bilden.

Frage 1116. Was versteht man unter den sogenannten Tremolanten der Orgeln, Harmoniums und Drehorgeln, und welche Einrichtung zeigen dieselben?

Fig. 620.



Antwort. Es ist dies eine durch einen besonderen Registerzug in oder außer Funktion zu setzende Vorrichtung, welche dem Tone ein mehr oder weniger starkes Beben mitteilt, infolge Unterbrechungen des Windzuflusses zu den Pfeifen oder Zungen, welche dadurch bewirkt werden, dass der Stoß des Orgelwindes auf das gehobene Ventil das auf diesem Ventil befestigte federnde Gewicht in eine pendelartige Bewegung versetzt. Beim Zurückschwingen der Feder bewirkt die Schleuderkraft des Gewichtes momentanen Verschluß des Ventiles, welches den Kanal nahe vorm Windkasten verschließt. Das Tempo der Unterbrechungen hängt vom Schwingungstempo der Feder ab.

---

c) Kombinationstöne.

α) Differenztöne.

Frage 1117. Was versteht man unter Kombinationstönen?

Antwort. Wenn zwei musikalische Töne von verschiedener Tonhöhe gleichzeitig kräftig und gleichmäßig anhaltend erklingen, so hört man häufig noch andere Töne mitklingen, deren Tonhöhe von dem Intervalle der beiden primären Töne abhängt. Diese unter dem Namen Kombinationstöne bekannten Töne sind nicht etwa in den zwei primären Tönen schon vorhandene Ober- und Nebentöne, die sich beim Zusammenklingen gegenseitig verstärken, denn sie können in den beiden einzelnen Tönen durch kein Mittel (wie z. B. Resonatoren) nachgewiesen werden, dagegen treten sie beim Zusammentönen derselben deutlich hervor, besonders wenn die zwei Töne wie z. B. beim Harmonium recht intensiv gleichmäßig anhalten.

Erkl. 1036. Diese Kombinationstöne wurden zuerst von Georg Andreas Sorge, Hof- und Stadtorganist zu Lobenstein (Reuß) entdeckt, aber erst durch den berühmten Violinspieler Tartini (1754) allgemeiner bekannt, weshalb dieselben wohl auch Tartini'sche Töne genannt werden. Sorge schreibt in seinem „Vorgemach zur musikalischen Komposition" (1745): „Wenn man auf einer Orgel *C* anschlägt, so werden *c*, *g*, *c'*, *e'* etc. so lange gelinde beben, als man den Ton hält. Ja noch mehr: Wenn man in einer Orgel eine Quinte z. B. *c''* und *g''* rein gestimmt hat, so wird sich das *c'* auch ganz gelinde mit hören lassen, welches auch bei Stimmungen der großen Terz wahrzunehmen, wenn man die Sesquialter, so aus einer Quinte (*g'*) und Terz (*e''*) besteht, stimmt. Ja sogar zwei Flutes douces geben, wenn man *c''* und *a''* rein zusammenbläst, noch den dritten Ton, nämlich ein *f'*.

Frage 1118. Wie lautet das Gesetz über die Schwingungszahl eines Kombinationstones?

Antwort. Wie die Zahl der Schwebungen gleich der Differenz der Schwingungszahlen der sie bildenden Töne ist, so ist auch die Schwingungszahl der Kombinationstöne gleich der Differenz in den Schwingungszahlen der beiden primären Töne, aus denen sie hervorgehen, weshalb Helmholtz sie auch Differenztöne nennt.

So hört man die nächst tiefere Oktave eines Tones mit, wenn gleichzeitig noch seine Quinte erklingt. Bei gleichzeitigem Ertönen von Grundton und Quarte hört man die tiefere Duodezime des Grundtones mit. Der Kombina-

Erkl. 1037. In der folgenden Tabelle haben wir die Differenztöne der gewöhnlichen harmonischen Intervalle zusammengestellt:

Intervalle	Schwingungsverhältnis	Differenz	Intervall zwischen dem Differenzton und dem tiefsten primären Ton
Oktave . .	1 : 2	1	Einklang
Quinte . . .	2 : 3	1	Oktave
Quarte . . .	3 : 4	1	Duodecime
Große Terz	4 : 5	1	2 Oktaven
Kleine Terz	5 : 6	1	2 Oktaven und 1 große Terz
Große Sexte	3 : 5	2	Quinte
Kleine Sexte	5 : 8	3	Große Sexte

Aus derselben erhellt, dass bei dem Intervall einer reinen Oktave gar kein Differenzton wahrgenommen werden kann. Es zeigt sich auch, dass die Intervalle, die kleiner als eine Oktave sind, Differenztöne geben, die tiefer sind, als der Grundton. Dasselbe ist jedoch keineswegs der Fall bei größeren Intervallen. Nehmen wir beispielsweise die Duodecime 1 : 3, so erhalten wir den Differenzton 2, also die höhere Oktave des Grundtones.

tionston von Grundton und großer Terz liegt zwei Oktaven tiefer als der Grundton. So geben *c''* und *g''* den Kombinationston *c'*; *c''* und *f''* geben *f*; *c''* und *e''* geben *c*.

Frage 1119. Welche Erscheinung tritt ein, wenn man statt zweier einfachen Töne zwei zusammengesetzte Klänge gleichzeitig ertönen läßt?

Antwort. In diesem Falle liefern nicht nur die Grundtöne, sondern auch die harmonischen Obertöne miteinander und mit den Grundtönen Kombinationstöne nach demselben Gesetze.

Frage 1120. Welcher Apparate müssen wir uns bedienen, um die Differenztöne deutlich hörbar zu machen?

Antwort. Um die zur Darstellung der Differenztöne erforderlichen kräftigen Primärtöne zu erhalten, bedient man sich am zweckmäßigsten:

1. der Doppelsirene, oder 2. stark intonierter Zungenpfeifen, 3. singender Flammen oder man benutzt 4. Königs Apparat, 5. Appunns Tonmesser oder endlich 6. eine Geige.

Frage 1121. Warum und wie lassen sich mit Hilfe der mehrstimmigen Sirene (Fig. 598 u. 600) besonders starke Kombinationstöne erzeugen?

Erkl. 1038. Oeffnen wir bei dem nebenstehend beschriebenen Versuche die Reihen mit 12 und 16 Löchern, wodurch wir eine Quarte erhalten, so liegt der Differenzton bedeutend tiefer als der Grundton, denn die Differenz der Schwingungszahlen ist 16—12 = 4;

Antwort. Die Kombinationstöne lassen sich am besten beobachten, wenn die primären Töne eine und dieselbe Luftmasse in heftige Erschütterung versetzen, deshalb ganz besonders, wenn man eine mehrstimmige Sirene auf einen Windkasten setzt und gleichzeitig zwei Löcherreihen anbläst. Hierdurch entstehen in der Luftmasse des Windkastens beiden Tönen entsprechende Schwingungen, und durch jede Reihe von

der Differenzton bildet also das Intervall 4/12 oder 1/3 mit dem Grundtone, und ist demnach die tiefere Duodezime desselben.

Oeffnungen wird nicht ein gleichmäßig zufließender Luftstrom entleert, sondern ein Luftstrom der durch den andern Ton schon in Schwingungen versetzt ist. Die Kombinationstöne sind unter diesen Umständen fast eben so stark wie die primären Töne.

Man hört nur einen Ton, wenn man nur eine Löcherreihe anbläst, öffnet man aber zwei Löcherreihen, z. B. mit 8 und 12 Löchern gleichzeitig, so hört man bei geringer Rotationsgechwindigkeit der Scheibe nur einen tiefen Ton und seine Quinte; erst wenn der tiefere Ton eine gewisse Höhe erreicht, bemerkt ein aufmerksamer Beobachter, dass derselbe noch von einem leisen, dumpfen Tone, der noch eine Oktave tiefer liegt, begleitet wird. Dreht sich die Scheibe n mal in der Sekunde, so sind die Schwingungszahlen der angegebenen Töne $8n$ und $12n$, also ihre Differenz $4n$; demnach macht der Differenzton halb so viele Schwingungen als der Grundton. Wenn nun die Umdrehungsgeschwindigkeit gering ist, so können wir den Differenzton $4n$ nicht wahrnehmen (siehe „Grenzen der Schallwahrnehmung'' I. Bd. Seite 99); je rascher die Sirene läuft, desto leichter hören wir den Differenzton, welcher immer die tiefere Oktave des Grundtones bildet, wenn dieser mit der Quinte zusammen erklingt.

Erkl. 1039. Für den Anfänger ist es nicht leicht, die Differenztöne in dem Zusammenklange zu erkennen, weil sie von geringer Intensität sind, während die primären Töne, die sie erzeugen, stets sehr kräftig sein müssen, und noch schwieriger ist es, ihre Tonhöhe zu erkennen. Tartini hat dieselben eine Oktave zu hoch angegeben, wie später der Petersburger Kapellmeister Sarti bemerkte.

Recht deutlich sind die Kombinationstöne, wenn man zwei Töne benutzt, die das Schwingungsverhältnis 2 : 3 haben; läßt man erst nur den Grundton erklingen und nimmt dann die Quinte dazu, so hört man das Auftreten des Differenztones (der tieferen Oktave des Grundtones) so deutlich, dass der Gesamtklang beinahe tiefer erscheint, als der Klang des Grundtones allein.

Da die Kombinationstöne manchmal sehr stark klingen, so ist es notwendig, ihre Verhältnisse zu den andern Tönen zu berücksichtigen. Wenn wir mehrere Töne miteinander kombinieren, so genügt es nicht allein zu untersuchen, ob dieselben für sich einen angenehmen Zusammenklang geben; man muß auch ihre Kombinationstöne prüfen und zusehen, in welchem Verhältnisse diese zu den kombinierten Tönen stehen.

Frage 1122. Wie lassen sich die Differenztöne auch mittelst zweier Orgelpfeifen vorführen?

Antwort. Wir nehmen zwei Orgelpfeifen, von denen die eine z. B. 200, die andere 250 Schwingungen in der Sekunde gibt. Sie geben einen Zusammenklang, welcher sich durch das Verhältnis 4 : 5 darstellen läßt, also eine große Terz. Klingen die beiden Pfeifen zusammen, so hört man neben

Erkl. 1040. Geben zwei Pfeifen die Töne *c''* (517) und *f''* (690), so ist deren Kombinationston *f* (173). Um letzteren schärfer hervortreten zu lassen, gibt man denselben Ton eine zeitlang mit einer dritten Pfeife *f* an; damit scheint, wenn diese Pfeife nicht mehr tönt, der

Kombinationston die Fortsetzung des verklungenen Pfeifentones zu bilden.

Auch mit zwei hohen, mit Stimmpfropfen versehenen Pfeifchen (Fig. 621) lassen sich die Kombinationstöne

Fig. 621.



sehr deutlich hervorrufen. Ueberaus deutlich erzeugen zwei aufschlagende Zungenpfeifen mit Schallkörpern die Differenztöne, welche t i e f e r sein müssen wie die Primärintervalle, so lange diese den Raum einer Oktave nicht überschreiten; bei größeren Abständen der Primärklänge fallen die Differenztöne z w i s c h e n dieselben.

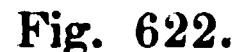
diesen beiden Tönen ganz deutlich einen tiefen Ton, der 50 Schwingungen in der Sekunde entspricht, eine Zahl, welche ¼ von 200 ist, also die zweittiefere Oktave des Grundtones bildet.

Für den Unterricht empfiehlt es sich zwei Glaspfeifen zu nehmen. So geben z. B. zwei Pfeifen mit den Tönen c^5 und d^6 beim kräftigen Anblasen einen sehr starken Differenzton. Man konstruiert (nach C. Baur) solche Pfeifen aus Glasröhren von 1 cm Durchmesser, und 6 resp. 9 cm Länge. Man verengert sie einerseits etwas, so dass sie konisch werden und bläst sie an diesem Ende mit einem engeren Glasröhrchen schief an. Man kann diese Röhrchen durch ein Stück Blech dauernd aneinander befestigen.

Frage 1123. Welches Mittels bediente sich Tyndall zur Erzeugung von Kombinationstönen?

Antwort. Tyndall benutzte dazu zwei stark singende Flammen von verschiedener Tonhöhe, deren eine Röhre man mittelst Schiebers verlängern kann, wodurch der Kombinationston allmählich steigt und zu überraschender Stärke anschwillt. Je geringer die Differenz der Schwingungszahlen ist, um so tiefer ist der Differenzton. Wenn wir den Schieber der einen singenden Flamme bald heben, bald senken, so steigt und fällt der

Kombinationston, dem Gesetze gemäß, dass die Zahl seiner Schwingungen der Differenz zwischen den Schwingungszahlen der ursprünglichen Töne gleichkommt. Gibt z. B. die kürzere Röhre den Ton *fis''* von 731 Schw. und die längere Röhre den Ton *ais'* von 461 Schw., so hören wir den Differenzton *cis'* von 270 Schwingungen.



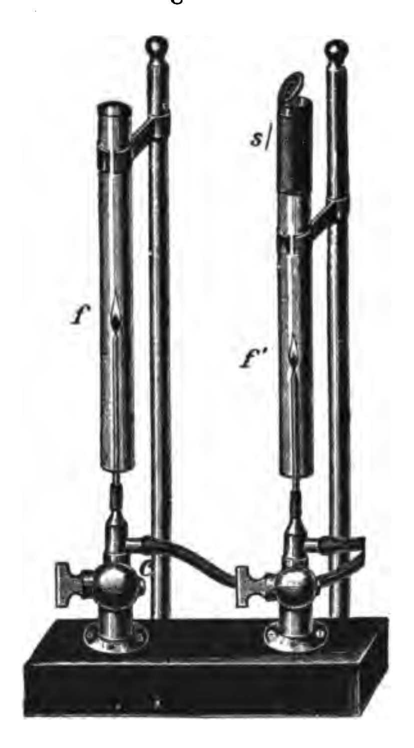
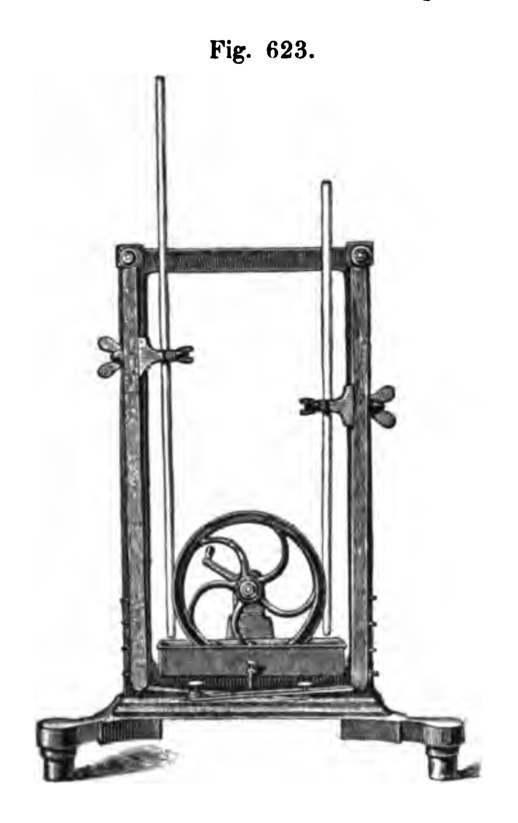


Fig. 622.

Frage 1124. Welche Einrichtung zeigt Königs S t o ß t ö n e a p p a r a t, dessen man sich mit Vorteil zur Vorführung der Kombinationstöne bedienen kann?

Antwort. Zwei Glasröhren von verschiedener Länge sind in ihrer Mitte an zwei um Gelenke drehbaren Leisten befestigt. Diese Glasröhren werden durch Gummibänder gegen die Peripherie eines Rades gedrückt, welches mit dikkem Tuch umwickelt ist und in einen Wassertrog taucht, so dass das Tuch beständig feucht bleibt. Dreht man das Rad, so werden die Glasstäbe der Längsrichtung nach in Schwingungen und kontinuierliches Tönen versetzt. Mit dieser Vorrichtung lassen sich die primären Töne, folglich auch der Kombinationston, beliebig lange anhalten; man nimmt den letzteren also leicht wahr und kann ihn auch nötigenfalls durch Resonatoren nachweisen. Dem Apparate

Fig. 623.



sind 12 abgestimmte Glasröhren beigegeben, welche das viergestrichene *c, d, e, f, g, a, ais, h* und das fünfgestrichene *c, e* und *fis* geben. (Die mechanischen und optischen Werkstätten von E. Leybold's Nachfolger, Köln a. Rh., liefern den vollständigen Apparat zu 400 Mark).

Frage 1125. Auf einem Klaviere bemüht man sich vergebens, die Kombinationstöne zu erzeugen, aber wie lassen sich dieselben mit Hilfe einer Geige wahrnehmen?

Erkl. 1041. Hat das *a'* z. B. 440 Schw., so hat *e'* deren $\frac{3}{4}$. 440 oder 330, und da 3 . 110 = 330 und 4 . 110 = 440 ist, so erfolgen durch beide Töne 110 Stöße in einer Sekunde, folglich muß der Differenzton zwei Oktaven unter *a'* liegen. Auf gleiche Weise erhält man mit *c''* und *e''* das *c*, mit *h''* und *d''* das *g''*.

Antwort. Man vernimmt die Kombinationstöne, wenn man sie auf einer Geige durch starkes und etwas anhaltendes Streichen von zwei Saiten bildet, wenn man das Ohr etwas nahe über die Saiten hält. Der am leichtesten entstehende Kombinationston wird (nach Vieth) erhalten, wenn man die *d'*-Saite einer Geige in *e'* stimmt und diese zugleich mit der *a'*-Saite anhaltend und gleichmäßig streicht, wobei das tiefe *A* zum Vorschein kommt.

Frage 1126. Sind die Kombinationstöne wirkliche in der Luftmasse vorhandene Töne, oder sind sie Ergebnisse rein subjektiver Gehörsempfindung?

Antwort. Man nahm bisher an, dass die Kombinationstöne eine selbständige Existenz außerhalb

Erkl. 1042. Bei räumlich getrennten Tonquellen (z. B. zwei Stimmgabeln, zwei Singstimmen oder Blasinstrumenten) entstehen Kombinationstöne, deren objektive Existenz von vielen Physikern bezweifelt wird, die vielmehr annehmen, dass das Trommelfell durch die Primärtöne in hinreichend kräftige kombinierte Schwingungen versetzt wird, wonach der Kombinationston das Produkt zweier verschiedener Schwingungsarten wäre, was aber der Erfahrung widerspricht, wonach das Ohr nur einfache Schwingungen als Ton empfindet und jede zusammengesetzte periodische Luftbewegung in solche Schwingungen zerlegt.

des Ohres haben oder objektiv sind, wenn die beiden dieselben erregenden Töne in ein und demselben Luftraume sich bilden; dass dieselben dagegen erst im Ohre entstehen, oder subjektiv sind, sobald die beiden Tonquellen von einander getrennt sind. Auf Grund der folgenden Untersuchungen können wir aber die objektive Existenz aller Kombinationstöne als eine feststehende Tatsache ansehen.

Frage 1127. In welchen Fällen und auf welche Weise läßt sich leicht der Nachweis erbringen, dass die Kombinationstöne objektiv existieren?

Erkl. 1043. Man nimmt einen Resonator, der z. B. das *c* (129) verstärkt. Sodann läßt man die Löcherreihe einer Doppelsirene 8 und 10, wobei das Verhältnis 4 : 5 in Betracht kommt, wirken. Die Töne dieses Verhältnisses werden, je schneller die Sirene umläuft, immer höher. Im Momente, wo die Löcherreihe 8 den Ton *c''* (517) und die Löcherreihe 10 den Ton *e''* (652) hören läßt, wird das mit dem Resonator *c* hörende Ohr eine deutliche Tonverstärkung des *c* hören. Denn *c''* : *e''* = 4 : 5 lassen den Differenzton 1, d. h. die tiefere Doppeloktave von 4, gleich 1 hören. Wie wir aber früher gelernt haben, wird die Luft eines Resonators nur dann in Schwingungen versetzt, wenn dem Eigentone des Resonators entsprechende einfache Schwingungen in denselben eindringen. Ebenso kann man mit einer Quincke'schen Interferenzröhre (Fig. 604) den Nachweis liefern, dass die Kombinationstöne der Orgelpfeifen oder eines Harmoniums objektive Existenz haben. Stimmt man eine solche Röhre auf einen der beiden Töne

Antwort. Dieser Nachweis läßt sich besonders dann leicht erbringen, wenn die Primärtöne aus einem gemeinsamen und nicht zu ausgedehnten Raume hervorgehen, wie dies der Fall ist, wenn die Kombinationstöne mit der mehrstimmigen Sirene, mit einem Harmonium, mit auf derselben Windlade stehenden Zungenpfeifen, mit scharf intonierten Prinzipalpfeifen, mit einer Violine oder einem Violoncell oder mit zwei mit dem Munde angeblasenen Pfeifchen (Fig. 621) hervorgebracht werden.

Dass die hierbei entstehenden Kombinationstöne objektiv in der Luftmasse existieren, kann man durch schwingende Membranen nachweisen, welche mit den Kombinationstönen im Einklange sind. Solche werden in Mitschwingungen versetzt, sobald man beide primäre Töne zugleich angibt. Statt der Membranen ist es bequemer, die Resonatoren zu gebrauchen. Dieselben sind viel empfindlicher als die Membranen, verstärken auch schwache Kombinationstöne beträchtlich, was nicht möglich wäre, wenn diese erst im Ohre entstehen würden und nicht schon in

ab, so tritt der Kombinationston auch dann deutlich auf, obwohl der eine der beiden Töne gar nicht zu dem Ohre dringen kann.

Nimmt man zwei Pfeifen, welche den Ton f^5 geben, deren eine man etwas tiefer stimmt, so hört man den Differenzton als ein Sausen von unbestimmter Tonhöhe und zugleich Schwebungen. Verschließt man die tiefere Pfeife mit dem Finger immer mehr und mehr, so werden die Schwebungen immer rascher und der Differenzton erhält schließlich eine bestimmbare musikalische Höhe. Folglich kann der Differenzton nicht das Resultat der Stöße sein, da beide gleichzeitig gehört werden.

der Luft vorhanden wären. O. Lummer verwendete (1886) zu diesem Zwecke einen Resonator, dessen eine Oeffnung mit einer dünnen Kautschukmembran verschlossen war und mittelst eines Mikrophons mit einem Telephon in Verbindung stand. Es kann also keinem Zweifel unterliegen, dass die Kombinationstöne in diesen, wie überhaupt in allen Fällen, in welchen sie durch Resonatoren oder sonstige Reagentien nachweisbar sind, eigene Systeme einfacher Schwingungen in der Luft bilden.

Frage 1128. Aus welchem Grunde hält L. A. Zellner (Wien) alle Kombinationstöne für objektiv im Luftraume bestehend, auch wenn sie von räumlich getrennten Klangquellen herrühren?

Erkl. 1044. Photographische Belege für die objektive Existenz der Kombinationstöne erzielten R. W. Forsyth und R. G. Sowter durch folgenden Versuch. Eine Stimmgabel, die genau auf 64 Schwingungen abgestimmt war und auf der einen Zinke einen Spiegel, auf der anderen ein gleich schweres Holzbrettchen trug, wurde durch eine Sirene zur Resonanz angeregt. Ein Bündel blauen Lichtes, von einer elektrischen Lampe durch eine ammoniakalische Lösung von Kupfersulfat kommend, wurde vom Spiegel auf eine sich gleichmäßig mit bekannter Geschwindigkeit fortbewegende photographische Haut geworfen und erzeugte hier vollkommen gerade Streifen. Wenn aber in der Nähe eine 64-Gabel ertönte, geriet der Spiegel durch Resonanz in Schwingungen und erzeugte auf der photographischen Haut eine Reihe von Wellen, deren Frequenz aus der Wellenlänge leicht be-

Antwort. Nach Zellner werden die Kombinationstöne nur in dem Masse schwächer, je weiter die Klangquellen räumlich auseinander liegen, aber sie ändern ihre Natur nicht. Einen besonderen Beweis hierfür liefert der mit demselben Intervalle mittelst der Doppelsirene hervorgerufene Differenzton, wenn das Intervall einmal bloß mit einer, und dann wieder mit zwei Scheiben erzeugt wird. Die große Terz z. B., gleichviel ob sie durch 8 : 10 mit der unteren, oder durch 12 : 15 mit der oberen Scheibe hergestellt wird, erzeugt bei gleicher Tonhöhe einen gleich starken Differenzton, der jedoch viel schwächer sein wird, wenn oben 12 und unten 15 Löcher geöffnet sind. „Es besteht gar kein Grund anzunehmen, dass dieser schwächere Kombinationston (und in gleicher Weise auch noch schwächere) nicht ebenfalls von derselben physikalischen Beschaffenheit sein sollte. Derselbe Nachweis läßt sich mit zwei Zungenpfeifen liefern, deren jede ihre eigene

stimmt werden konnte; sie entsprach 64 Schwingungen in der Sekunde. Wurde mittelst einer Sirene ein Ton von 256 Schwingungen erzeugt, so wurden gerade Bänder mit nur ganz geringen Unebenheiten photographiert; wenn aber gleichzeitig die Note von 5 . 64, also 320 Schwingungen angegeben wurde, so erhielt man wieder die Wellenfigur mit 64 Schwingungen. Die objektive Realität des Differenztones war hierdurch bewiesen. (Proceedings of the Royal Society 1898, Vol. LXIII, p. 396.)

Windlade und ihr eigenes Gebläse hat und die an beiden Enden des Hörsaales aufgestellt sind.

Frage 1129. Wir haben also die objektive Existenz der Differenztöne als eine feststehende Tatsache anzusehen. Wie diese Töne aus dem Zusammenklange entstehen, das versuchte in erster Reihe Lagrange durch welche Betrachtung zu beantworten?

Erkl. 1045. Die nebenstehende Erklärung ist eine sehr naheliegende, denn die Schwingungszahl des Differenztones stimmt tatsächlich mit der Zahl der Stöße überein. Wir wollen die Verdichtungsstöße des Tones f' durch eine Punktreihe darstellen und darunter die Verdichtungsstöße von dem um eine Quarte tiefer liegenden c' in derselben Weise bezeichnen. Der Zwischenraum zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten bedeutet dann die Dauer einer ganzen Schwingung, und daraus ist ersichtlich, dass auf vier Wellen des ersten Tones immer drei des zweiten Tones kommen. Durch dieses Zusammentreffen entstehen die Stöße, welche nach der nebenstehenden Theorie die Empfindung des Differenztones C veranlassen.

Antwort. Lagrange (1800) betrachtet die Bewegung eines Luftteilchens infolge des gleichzeitigen Erklingens zweier Töne und sagt, dass beim Begegnen dieser Töne ein Luftteilchen eine Bewegung erhält, welche verschieden ist von derjenigen, die von jedem einzelnen Tone hervorgebracht wird. Fallen nun ihre Schwingungen immer nach einer gegebenen Zeit zusammen, „so kann der fortgesetzte regelmäßige Eindruck dieser zusammengesetzten Bewegung von den einfachen Bewegungen der einzelnen Teile ausgeschieden werden, und ein hinlänglich gutes Ohr wird einen dritten Ton hören, dessen Verhältnis zu den übrigen gefunden wird, wenn man die Anzahl der Schwingungen miteinander vergleicht, welche jeder der Töne zwischen zwei aufeinander fallenden zusammentreffenden vollbringt."

f' . . . .

c' . . . .

C o o o o o

Hiernach ergibt sich, dass Lagrange als Ursache der Kombinationstöne die Schwebungen oder Stöße annimmt, die, wenn sie schnell genug werden, vom Ohre nicht mehr einzeln unterschieden werden können und sonach das Gefühl eines neuen Tones hervorrufen.

Frage 1130. Da die Stöße durch Summierung zweier Töne entstehen, so müßten nach der vorstehenden Theorie die Kombinationstöne auch noch bei schwachen primären Tönen hörbar sein, was durchaus nicht der Fall ist. Aus diesen und anderen Gründen hat Helmholtz (1856) die frühere Erklärungsweise verlassen, und auf rein mathematischem Wege ist es ihm gelungen, die Entstehung der Kombinationstöne in welcher Weise zu erklären?

Erkl. 1046. Hallström gibt folgende Theorie der Kombinationstöne, die aber nur Giltigkeit hat, wenn s/x und r/x ganze Zahlen sind. Sind r und s die Schwingungen der gleichzeitig angestimmten Töne und x die Schwingungen des zugehörigen Kombinationstones in einer Sekunde, so vollbringen die tönenden Körper in derselben Zeit $(1/x)$, in welcher dem Kombinationstone eine Schwingung zukommt, respektive r/x und s/x Schwingungen. Wenn aus ihrem Zusammenklingen eine einzige Pulsation hervorgehen soll, so müssen dieselben notwendigerweise in einem solchen Verhältnisse stehen, dass die Zahl s/x um eine Einheit die Zahl r/x übertrifft, so dass $s/x - r/x = 1$ oder $x = s - r$ ist. Hiernach würde man folgende Kombinationstöne erhalten: Aus r und s den Ton $s-r$; aus $(s-r)$ und r den Ton $2r-s$; aus $(2r-s)$ und s den Ton $2(s-r)$; aus $(2r-s)$ und

Antwort. Die Luftschwingungen, welche durch einen Schall erzeugt werden, sind nur dann einfache pendelartige Schwingungen, wenn sie von sehr kleiner Amplitude sind; haben die Schwingungen aber größere Amplituden, so entstehen durch Aufeinanderstoßen der schwingenden Teilchen sekundäre Schwingungsbewegungen. Bedingung des objektiven Entstehens der Kombinationstöne ist nach Helmholtz, dass eine und dieselbe begrenzte Luftmasse durch sehr große Amplituden der Primärklänge in heftige Erschütterungen versetzt wird. Es wird demnach jener Teil der eingeschlossenen Luftmenge, welcher die Hervorbringung des einen Primärtones bewirkt, durch die Schwingungen des andern bereits in einem bestimmten Zustande der Vibration sich befinden, woraus neue Systeme einfacher Schwingungen entstehen, deren Schwingungsdauer derjenigen der Kombinationstöne entspricht. Auf diese Weise kommen Kombinationstöne zustande, deren Schwingungszahl entweder gleich der Differenz oder der Summe der Schwingungszahlen der primären Töne ist.

So entdeckte Helmholtz die Summationstöne auf dem Wege der Theorie, ehe er dieselben gehört hatte; und seine Rech-

($s-r$) den Ton $3r-2s$ usw. Die hier ausgefallenen Kombinationen führen auf bereits vorangegangene, also nicht auf neue Töne, z. B. $s-r$ und s geben r; $2r-s$ und r geben $s-r$ u. s. f.

nung fand eine glänzende Bestätigung, als das Experiment zeigte, dass auch diese zweite Art der Kombinationstöne tatsächlich vorhanden ist.

β) Summationstöne.

Frage 1131. Die Kombinationstöne zerfallen in welche zwei Klassen?

Antwort. 1) Die von Sorge und Tartini entdeckten Differenztöne, deren Schwingungszahlen gleich sind den Differenzen zwischen den Schwingungszahlen der primären Töne.

2) Die von Helmholtz entdeckten Summationstöne, deren Schwingungszahlen gleich sind der Summe der Schwingungszahlen der primären Töne.

Erkl. 1047. Sucht man die Kombinationstöne von zwei zusammengesetzten Klängen auf, so können sowohl die Grundtöne als deren Obertöne miteinander sowohl Summationstöne als Differenztöne geben. Die Zahl der vorhandenen Kombinationstöne ist in solchem Falle sehr groß, doch sind im allgemeinen die Differenztöne stärker als die Summationstöne, weshalb die letzteren auch viel länger verborgen waren als die ersteren.

Frage 1132. Unter welchen Umständen können wir die Summationstöne deutlich hören?

Antwort. Wir können die Summationstöne deutlich wahrnehmen, wenn die beiden primären Töne (gleichwie bei der Erzeugung der Differenztöne) dieselbe Luftmasse in Bewegung setzen; man hört sie deshalb mit der mehrstimmigen Sirene oder mit Orgelpfeifen am besten, besonders unter Anwendung der Resonatoren. Auch läßt sich ihre Beobachtung mittelst Appuns Tonmesser erleichtern. Derselbe enthält 32 Zungen, von denen jede folgende 4 Schwingungen in der Sekunde mehr gibt als die vorhergehende, so dass beim Anblasen von je zwei nebeneinanderliegenden Zungen 4 Stöße entstehen. Bläst man zwei um 8 Zungen voneinander entfernte Töne an, so hört man mit einem Resonator immer den Differenzton $C_{-2} = 32$; bläst man den tiefsten

Erkl. 1048. Ruft man das *a'* = 435 Schwingungen entweder als Differenzton mittelst der Quinte *a''*—*e'''* = 870 — 1305 Schw., oder als Summationston (z. B. durch die Quinte *f*—*c'* = 174 — 261 oder durch die große Sexte *e*-*cis'* = 163—274) hervor, so hört man beim Gebrauche eines *a'*-Resonators den Summationston sehr deutlich, ja eine mit genau abgestimmten Klangkästchen versehene Gabel von 435 Schw. wird durch Resonanz ins Mittönen geraten, was keine Wirkung von Obertönen sein kann, da in keinem dieser 4 Primärklänge das *a'* als Oberton vorkommt. Durch A. W. Rücker und E. Edser ist stets durch die Schwingungen der Resonator - Stimmgabel die objektive Existenz von Differenz- und Summa-

tionstönen nachgewiesen worden. (Philosophical Magazine. 1895, Ser. 5, p 341.)

Erkl. 1049. Eine von Dvorák zuerst beobachtete und als Variationston bezeichnete Art von Kombinationston entsteht, wenn man in einem Zimmer einen Ton erzeugt, welcher allmählich in die Höhe steigt oder in die Tiefe sinkt. Im Freien ist derselbe nicht zu erhalten. Daraus folgt, dass derselbe durch Kombination der direkten Schallwellen mit den von den Zimmerwänden reflektierten entsteht.

Ton $c = 128$ und die um 16 Zungen höher liegende Quinte $g = 192$ an, so hört man als Differenzton die tiefere Oktave $C_{-1} = 64$ und den Summationston $e' = 320$; man hört also den Akkord c, g, e'. Ebenso hört man mit dem für e'' abgestimmten Resonator den Summationston der beiden Töne c' und g'. Grundton und Quinte liefern immer die Terz der folgenden Oktave $(2 + 3 = 5)$; Grundton und große Terz $(4 + 5 = 9)$ liefern die Sekunde der höheren Oktave als Summationston, usw. Da den Summationstönen gar keine Schwebungen entsprechen, so können sie auch unmöglich aus solchen hervorgehen.

Frage 1133. Welcher allgemein gültige Satz gibt uns Aufschluß über die Art und Lage der Kombinationstöne, wenn wir zwei Primärtöne aus der Reihe der Obertöne zusammen erklingen lassen?

Erkl. 1050. Der Differenzton ist nicht immer tiefer gelegen als der tiefste Primärton, denn wenn wir aus der Reihe der Obertöne

C	c	g	c'	e'	g'	c''
n,	2n,	3n,	4n,	5n,	6n,	8n,

z. B. das Verhältnis 3 : 8 ($g : c''$) nehmen, so klingt als Differenzton ein Ton $e' = (8-3) = 5n$ mit, während der Summationston $8 + 3 = 11n$ Schwingungen enthalten wird.

Antwort. Wenn aus der Reihe der Obertöne (siehe nebenstehende Erklärung) je zwei Töne als Primärtöne zusammen erklingen, so klingt ein Differenzton mit, welcher ebenfalls ein Ton der Obertonreihe ist und tiefer liegt wie der höchste Primärton; es klingt ferner ein Summationston mit, welcher ebenfalls ein Ton der Obertonreihe ist und höher liegt als der höchste Primärton.

γ) Kombinationstöne durch Intermittenz.

Frage 1134. Durch welchen Versuch läßt sich zeigen, dass Kombinationstöne auch bei scheinbar nur einer Tonquelle entstehen können, wenn der Klang durch Intermittenz gleichsam gespalten wird?

Antwort. Dieser Fall tritt ein, wenn zwischen einer Stimmgabel und dem Ohre eine Sirenenscheibe rotiert (Fig. 624). Sind die Oeffnungen der Scheibe von namhafter Größe (12 mm) und ist die Schei-

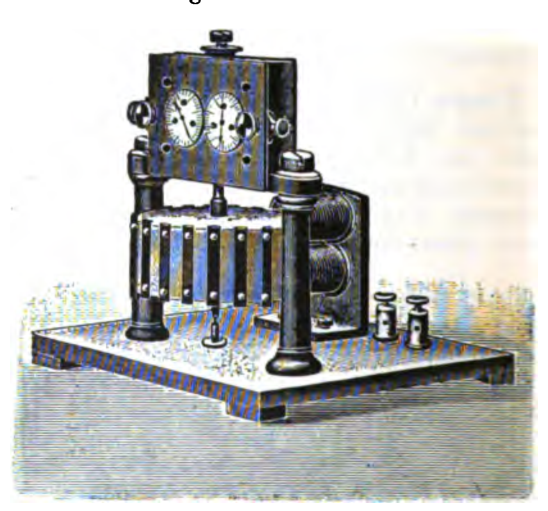
Erkl. 1051. Mit größerer Genauigkeit als mittelst der Sirene und der Gabel lassen sich diese Vorgänge an dem, von dem Dänen Paul La Cour erfundenen phonischen Rade beobachten. Diese Vorrichtung (welche in der Telegraphie u. Chronographie verschiedene Anwendung gefunden hat), eignet sich auch zur direkten Bestimmung absoluter Schwingungszahlen.

Das phonische Rad (Fig. 625) besteht aus einem hufeisenförmigen Elektromagneten, vor dessen Polen sich eine aus Buchsbaumholz bestehende und mit etwas Quecksilber gefüllte Trommel bewegt, auf welche 20 Anker aus weichem Eisen aufgeschraubt sind. Der Elektromagnet wird periodisch dadurch erregt, dass eine Stimmgabel mit elektromagnetischem Antriebe den Stromkreis schließt und öffnet. Bewegt sich am Elektromagneten während eines jeden Stromimpulses nur ein einziger der auf der Trommel befindlichen Anker an seinen Polen vorüber, so wird durch diese regelmäßigen Stromimpulse die gleichförmige Drehung des Rades aufrecht erhalten. Der obere Teil der Trommelachse, die vertikal gelagert ist, greift in ein Zählwerk ein, das die Zahl der Stromimpulse direkt ablesen läßt.

Fig. 624.



Fig. 625.



be selbst groß (50—60 cm), so werden mit der der zunehmenden Geschwindigkeit der Umdrehungen proportionalen Erweiterung des Intervalles zwischen dem Gabel- und dem Unterbrechungstone nach der Höhe zu zugleich die den Intervallen entsprechenden Differenztöne auftreten und diese ihre ersten Obertöne, besonders die Duodezime, deutlich hören lassen, wodurch, namentlich bei den Intervallen der großen und kleinen Terz, der Quarte und der Quinte, teils fünf-, vier-, oder dreistimmige Akkorde auftreten. Die Grundtöne sind, gleichwie deren Obertöne, zunächst Reibungstöne, da sie auch ohne das Erklingen der Stimmgabel vernommen werden. Einen Beweis dafür liefert der Umstand, dass deren Tonhöhe dieselbe bleibt, wenn man bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit einen Luftstrom durch die Löcher sendet.

Da ihre Schwingungszahlen jedoch mit der Differenz der Schwingungszahlen der Gabel und des jeweiligen Unterbrechungstones übereinkommen, so wird der Rei-

Je schneller nun das Rad gedreht wird, um so rascher folgen einander die Anziehungsstöße, welche, zur Schwingungszahl der Gabel summiert, Unterbrechungstöne erzeugen, deren Höhe mit der zunehmenden Schnelligkeit proportional wächst. Da man bei diesem Apparate den Umlauf des Rades in jedem Momente willkürlich beschleunigen oder verlangsamen kann, so läßt sich jede Phase der wechselnden Erscheinungen beliebig lange festhalten und beobachten.

Da nach jedem Anziehungsstoße eine vollständige Unterbrechung des Klanges eintritt, sobald am Elektromagneten eine Ankerlücke passiert, so sind die Erscheinungen ungemein deutlich wahrzunehmen, zumal, wenn man den Apparat, oder selbst nur den Tisch, auf welchem er sich befindet, mittelst eines Stabes aus Tannenholz mit dem Ohre in Verbindung bringt. Die Firma Ferd. Ernecke, Berlin SW. liefert diesen Apparat zu Mk. 130.

bungston durch den Differenzton verstärkt und diese Verstärkung bewirkt zugleich jene der Obertöne.

Es wirken also hier zusammen der Gabelton, der Unterbrechungston, der durch die Differenz erster Ordnung beider Klänge verstärkte Reibungston, und dessen Oberton, endlich der Differenzton vom Grundtone und Gabeltone.

Das Entstehen des Unterbrechungstones beruht auf der Summierung der Zahl der Intermittenzen mit der Schwingungszahl der Gabel. Wiewohl nun hier ein Summieren der Schwingungszahlen stattfindet, so ist der neu entstandene Ton kein Summationston, denn solche können nur aus zwei vorhandenen Tonquellen als ein Drittes hervorgehen.

δ) König's Stoßtöne.

Frage 1135. Während man bisher angenommen hatte, dass Stöße nur bei zwei wenig voneinander verschiedenen Tönen auftreten, kam König durch neue Beobachtungen „Ueber den Zusammenklang zweier Töne" (Poggendorffs Annalen, Bd. 157, 1876) zu welchem Schlusse über das Auftreten von Stößen?

Antwort. König wies durch seine Beobachtungen nach, dass Stöße nicht nur dann entstehen, wenn zwei Töne miteinander nahe im Einklange sind, sondern auch dann, wenn zwei weit auseinander liegende Töne miteinander nahe ein harmonisches Intervall bilden, d. h. wenn die Schwingungszahl des einen Tones nahezu ein ganzes Vielfaches der Schwingungszahl des anderen Tones ist.

Erkl. 1052. Man suchte König gegenüber die Stöße der nahezu harmonischen Intervalle so zu erklären, dass man annahm, die Obertöne des tieferen Tones im Zusammenklange mit dem primären höheren seien die Ursache dieser Stöße; aber diese Annahme ist unhaltbar, denn die Stöße der weit auseinander liegenden Intervalle existieren auch, wenn kein Oberton des primären Tones vorhanden ist. Die von König benutzten Stimmgabeln ließen die betreffenden Obertöne gar nicht hören.

Frage 1136. Wie läßt sich das von König aufgestellte Gesetz beweisen: „dass nicht nur zwei nahe unisono klingende Töne, sondern auch zwei nahe um eine Oktave auseinanderliegende Töne langsame und leicht zu zählende Stöße liefern?"

Erkl. 1053. Zum Nachweise des vorstehenden Gesetzes ließ sich Melde einen Appunn'schen Stoßapparat von 33 Zungen auf 97 Zungen erweitern, so daß folgende Obertöne zur Verfügung standen:

1. Zunge, 33. Zunge, 65. Zunge, 97. Zunge
$c = 128$ $c' = 256$ $g' = 384$ $c'' = 512$.

Nähert sich der obere Ton n' immer mehr dem g' mit $3 \cdot 128 = 384$ Schwingungen, während der tiefste Ton unverändert auf 128 Schwingungen bleibt, so gibt

$n' = 376$ $(3 \cdot 128 - 376) = 8$ Stösse mit dem unteren Tone n,
$n' = 380$ $(3 \cdot 128 - 380) = 4$ " " " " " "
$n' = 384$ $(3 \cdot 128 - 384) = 0$ " " " " " "
$n, = 388$ $(388 - 3 \cdot 128) = 4$ " " " " " "
$n' = 392$ $(392 - 3 \cdot 128) = 8$ " " " " " "

usw. Daraus folgt der allgemeine Satz: „dass zwei Töne, die nicht weit um die Strecke eines Obertones auseinander liegen, langsame und leicht zu zählende Stöße liefern".

Antwort. Angenommen, wir benutzen einen Appunn'schen Stoßapparat mit 97 Zungen, also 96 Intervallen von $c = 128$ bis $c'' = 512$, so dass jeder folgende mit jedem vorausgehenden Zungentone $(512-128) : 96 = 4$ Stöße gibt. Die beiden ersten Zungen 128 und 132 geben 4, die erste mit der dritten Zunge $136 - 128 = 8$, die erste mit der vierten Zunge $140-128 = 12$ Stöße usw. Dementsprechend läßt sich erwarten, dass die Zahl der Stöße mit der Schwingungszahl des zweiten höheren Tones kontinuierlich steigt, was aber keineswegs der Fall ist; denn wenn die erste mit der 30. Zunge zusammentönt, so erhalten wir nicht $244-128 = 116$ Stöße, sondern nur $2.128 - 244 = 12$ Stöße; die 31. mit der ersten Zunge zusammentönend gibt nicht $248-128 = 120$ Stöße, sondern nur $2.128-248 = 8$ Stöße, und der Ton 252 gibt mit 128 nicht 124, sondern nur $2.128-252 = 4$ Stöße. Die Oktave 256 gibt mit 128 keine Stöße, dagegen gibt 128 mit 260 wieder 4 Stöße, nämlich $(260-2.128)$, 128 mit 264 gibt $(264-2.128) = 8$ Stöße, 128 mit 268 gibt $(268-2.128) = 12$ Stöße usw., wodurch das obige Gesetz bewiesen ist.

Frage 1137. Welches Resultat erhalten wir, wenn wir die unteren und oberen Stöße summieren?

Erkl. 1054. König unterscheidet untere und obere Stöße. Entfernt

Antwort. Bezeichnen wir die Schwingungszahl des Grundtones mit n (also seine Obertöne mit $2n$, $3n$, $4n$), und die des höheren Tones mit n', so ist die Zahl m der unteren Stöße (siehe die neben-

man sich mit einem höheren Tone n' von einem tieferen Tone n, so nimmt man Stöße wahr, die immer schneller werden, und diese Stöße nennt König untere Stöße. Zugleich mit diesen hört man aber eine zweite Art von Stößen, die oberen Stöße, welche bei stetiger Entfernung des Tones n' vom Grundtone n, d. h. bei stetiger Zunahme der Schwingungszahl des höheren Tones an Zahl abnehmen und mehr und mehr deutlich zählbar werden, wenn sich der Ton n' einem Obertone des Grundtones n nähert, und deren Zahl gleich Null wird, wenn der Ton n' den Oberton von n völlig erreicht hat.

stehende Erklärung) $m = n'-n$ (siehe die vorstehende Antwort), und die Zahl der oberen Stöße ist $m' = 2n-n'$; mithin ist $m + m' = n$, d. h. in der ersten Periode, d. i. innerhalb des Grundtones n und des ersten Obertones $2n$ ist die Summe der unteren und oberen Stöße unabhängig von n' und stets konstant gleich der Schwingungszahl n des Grundtones.

In der zweiten Periode, d. h. innerhalb des ersten und zweiten Obertones ist $m = n'-2n$ und $m' = 3n-n'$ (s. Erkl. 1053), folglich ist auch hier, wie überhaupt in jeder Periode $m + m' = n$.

Frage 1138. Welche allgemein gültigen Gleichungen erhalten wir für die Zahl der unteren und oberen Stöße für jede beliebige Periode?

Erkl. 1055. Fallen die beiden nebenstehenden Differenzen kleiner als 64 aus, so entsteht Rauhigkeit, Rasseln oder Rollen; wird die Differenz größer als 64, so hören wir einen Stoßton. (S. folgende Antwort.)

Antwort. Bezeichnen wir mit der ganzen positiven Zahl h die Ordnungszahl der Periode, so hat man für die Zahl der unteren Stöße

$$m = n' - hn$$

und für die Zahl der oberen Stöße

$$m' = (h + 1)\, n - n'.$$

Die Zahl m der unteren Stöße ist also immer gleich dem positiven Reste der Division n'/n, die Zahl m' gleich dem negativen Reste.

Frage 1139. Was können wir beobachten, wenn wir die Versuche (siehe Antwort 1135) mit immer höheren Grundtönen wiederholen?

Erkl. 1056. Gehen wir von $c' = 256$ allmählich bis $g' = 384$, so gehen die erst einzeln hörbaren unteren Stöße schon ehe die Sekunde erreicht ist, in ein Rasseln über, welches bis zur großen Terz ($n' = 320$, mithin $m = 320-256 = 64$ Stöße) zu einer bloßen Rauhigkeit wird. Zugleich hört man ein schwaches großes $C = 64$. Bis zur Quinte ($n' = 384$) steigt dieser Ton, also der untere Stoßton bis zum kleinen $c = 128$, während von der Rauhigkeit von etwa $n' = 360$ bis 368 ab nichts mehr zu

Antwort. Wiederholen wir die Versuche in höheren Oktaven, so gelten dieselben Gesetze, aber die Stöße werden so rasch, dass sie nicht mehr bei so weiten Intervallen zu beobachten sind. So z. B. sind bei $n = 512$ die unteren und oberen Stöße nur ganz in der Nähe des Grundtones und der harmonischen Obertöne als Stöße wahrzunehmen. Dagegen gehen sie nun, wenn sie schneller und schneller werden, infolge ihrer großen Zahl in voneinander zu unterscheidende Töne über, welche König als untere und obere Stoßtöne bezeichnet hat.

hören ist. Von $n' = 384$ bis 448 steigt der untere Stoßton bis $g = 192$ und ist auffallend stark im Verhältnis zu der Intensität, welche er von $m = 64$ bis $m = 128$ hatte. Der durch die oberen Stöße m' erzeugte Ton läßt sich schon von der Terz ab bis zur Quinte, während er von g bis c sinkt, vermittelst der Stöße von Hilfsgabeln, mit denen er selbst wieder Stöße gibt, nachweisen, wenn er auch sonst kaum hörbar ist.

Man ermittelt die Schwingungszahlen derselben nach den beiden vorstehenden Gleichungen.

Ehe die einzeln hörbaren Stöße zu den Stoßtönen verschmelzen, machen sie sich durch einfaches Rollen bemerklich, welches sich bei höherer Schwingungszahl zu einem verworrenen Rasseln steigert, um dann aus einem rauhen in einen reinen Zusammenklang überzugehen.

Frage 1140. Nehmen wir $c''' = 1024$ zum Grundtone der Intervalle, so kommen wir damit in diejenige Gegend der Skala, welche für die Beobachtung der Stoßtöne am geeignetsten ist. Welche Stoßtöne bekommen wir innerhalb dieser dreigestrichenen Oktave zu hören?

Antwort. Die Stoßtöne der ersten Periode in der dreigestrichenen Oktave lassen sich in folgender Weise hören:

n	n'	Intervall	m	m'	Bemerkungen
$c''' = 1024$	$d''' = 1152$	8 : 9	$c = 128$	—	m ist allein und gut bemerkbar
„	1194,6	6 : 7	$f = 170,6$	—	m ist allein und gut bemerkbar
„	$e''' = 1280$	4 : 5	$c' = 256$	$g'' = 768$	m ist lauter, m' schwächer
„	$f''' = 1365,3$	3 : 4	$f' = 341,3$	$f'' = 682,6$	m u. m' verschmelzen zu einem Klange
„	1408	8 : 11	$g' = 384$	$e'' = 640$	m u. m' sind gleich laut
„	$g''' = 1536$	2 : 3	$c'' = 512$	$c'' = 512$	$m = m'$, der Ton ist sehr stark
„	1664	8 : 13	$e'' = 640$	$g'' = 768$	m u. m' gleich stark und deutlich
„	$a''' = 1706,6$	3 : 5	$f'' = 682,6$	$f' = 341,3$	m u. m', stärker als bei der Quarte und auch einzeln hörbar
„	1792	4 : 7	$g'' = 768$	$c' = 256$	m u. m' gleich stark und deutlich
„	$h''' = 1920$	8 : 15	—	$c = 128$	m unhörbar, m' deutlich hörbar.

Frage 1141. Was verstehen wir unter **s e k u n d ä r e n S t ö ß e n u n d S t o ß t ö n e n ?**

Antwort. Nach König verhalten sich zwei Stoßtöne nahe dem Einklange, der Oktave und Duodezime zueinander, wie zwei primäre Töne und geben miteinander Stöße und Stoßtöne zweiter Ordnung oder **s e k u n d ä r e S t ö ß e u n d S t o ß t ö n e.**

Erkl. 1057. Ein sekundärer Stoßton wird beobachtet, wenn der Ton 2048 mit dem Tone 2816 zusammenklingt. Man hört laut $m = 2816-2048 = 768$ und $m' = 4096-2816 = 1280$ und noch deutlich $m'-m = 1280-768 = 512$.

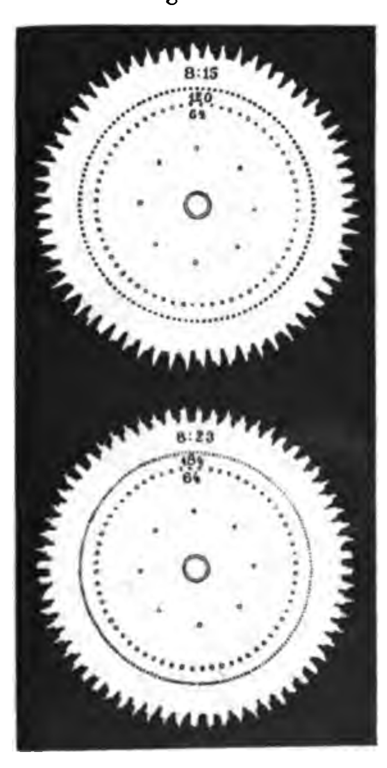
Frage 1142. Welcher Apparate bedient man sich mit Vorteil um die erwähnten Stöße und Stoßtöne auf leichte Weise und deutlich wahrnehmbar vorzuführen?

Antwort. Dazu bedient man sich am besten der von König konstruierten **W e l l e n s i r e n e n s c h e i b e n** für eines der Intervalle 8 : 9 bis 8 : 24. Mit diesen Scheiben, die auf eine beliebig große Schwungmaschine gesetzt werden können, lassen sich beim langsamen Drehen die Stöße, beim schnelleren die Stoßtöne ganz entsprechend denen hören, welche man beim Zusammenklange zweier Stimmgabeltöne (welche König anfänglich zu diesen Experimenten benutzte) beobachtet, d. h. die Sekunde 8 : 9 bringt den unteren Stoßton 1, die Septime 8 : 15 den oberen Stoßton 1, und die gestörte Duodezime 8 : 23 den oberen Stoßton der zweiten Periode, der wieder gleich 1 ist, laut und deutlich hervor, und ebenso lassen die Verhältnisse 8 : 11 und 8 : 13 das gleichzeitige Auftreten des oberen und unteren Stoßtons 3 und 5, 5 und 3 deutlich wahrnehmen.

Man kann dem Ohre bei der genauen Bestimmung der gehörten Töne dadurch zu Hilfe kommen, dass man jede Scheibe mit Löcherkreisen versieht, welche den Schwingungszahlen der primären Töne, wie denen der Stoßtöne entsprechen, und dann abwechselnd diese Löcherkreise und den ausgeschnittenen Rand anbläst (siehe Fig. 626).

Erkl. 1058. Bläst man eine einfache Sinuskurve (siehe Seite 268) durch eine normale Spalte an, so hört man einen

Fig. 626.



schwachen, sehr sanften Ton, der durchaus den Charakter eines einfachen Tones zu haben scheint, sobald man jedoch

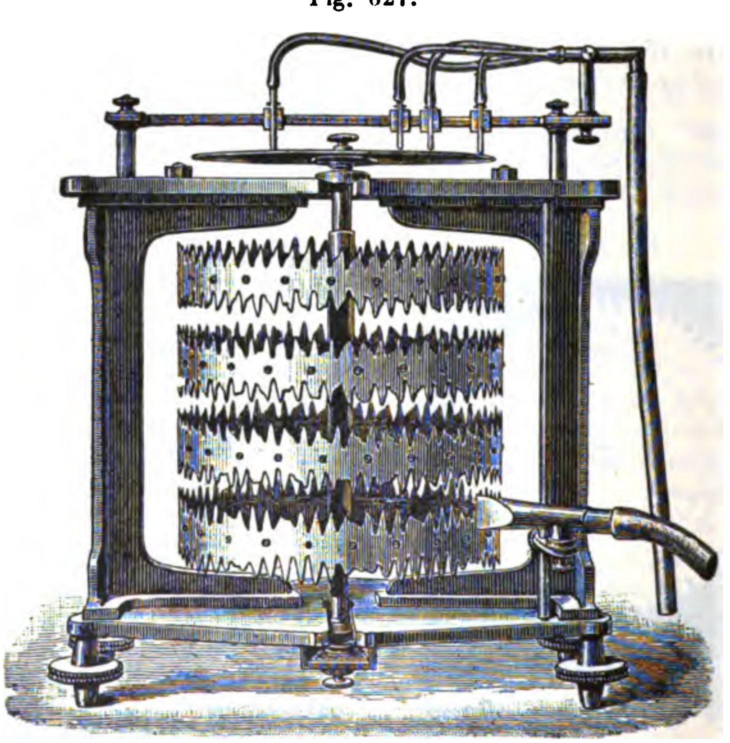
die Windspalte etwas schräg stellt, wird der Klang sofort stärker und schärfer, und geht bei genügender Abweichung der Spalte von der Normalen in den Klang einer durchschlagenden Zunge, also einen Klang mit starken harmonischen Tönen über. Es ist also immer leicht, bei der Wellensirene einen einfachen Ton in einen durch starke Obertöne gebildeten Klang zu verwandeln und ebenso auch den Zusammenklang zweier einfachen Töne in einen Zusammenklang zweier Klänge mit starken Obertönen.

Erkl. 1059. Aus den von König angegebenen Beobachtungen (Wiedemanns Annalen, XII. Band, 1881) geht hervor, „dass Differenztöne und Summationstöne auch beim Zusammenklange einfacher und durch gesonderte Tonquellen erzeugter Töne, wenn dieselben eine sehr große Intensität besitzen,

Will man ein Intervall allein untersuchen, so ist eine solche Scheibe das zweckmäßigste und einfachste Mittel; hat man jedoch die Absicht, eine ganze Reihe von Intervallen zu prüfen und die bei denselben erhaltenen Resultate miteinander zu vergleichen, so tut man besser, die Kurven auf geraden Streifen auszuschneiden und diese um Räder zu legen, so dass sie einen Zylindermantel bilden.



Fig. 627.



Jeder auf einem solchen Rade befestigte Streifen kann dann an beiden Rändern ausgeschnitten sein, und dieselbe Achse mehrere solcher Räder tragen. Figur 627 zeigt einen Apparat dieser Art mit vier Rädern für die 8 Intervalle der ersten Periode von 8 : 9 bis 8 : 16, und die Disposition desselben ist außerdem so getroffen, dass diese Achse mit vier Rädern sofort durch eine andere mit eben

nachgewiesen werden können, dass sie aber außerordentlich viel schwächer sind als die Stoßtöne, so dass beim Zusammenklange zweier Klänge mit einigermaßen starken Obertönen aller Wahrscheinlichkeit nach in den meisten Fällen die hörbaren Töne, deren Schwingungszahlen gleich der Summe der primären Töne sind, Stoßtöne der Obertöne und nicht Summationstöne der primären Töne (im Helmholtz'schen Sinne) sein dürften".

Erkl. 1060. Die Wellensirenenscheiben für die Intervalle 8 : 9 bis 8 : 24 liefert die Firma E. Leybold's Nachfolger, Köln a. Rh. zu dem Preise von Mk. 70. Die Wellensirene (Fig. 627) mit Windlade und Ventilen liefert dieselbe Firma zu 900 Mark.

so vielen Rädern für die Intervalle der zweiten Periode von 8 : 17 und 8 : 24 ersetzt werden kann.

Auch eine Sirenenscheibe mit Löcherkreisen, welche den Schwingungszahlen der primären Töne und der Stoßtöne entsprechen, die beim Anblasen der Kurven gehört werden, kann auf der Achse des Apparates befestigt werden, und die Figur zeigt die einfache Anordnung, durch welche es möglich wird, mehrere Löcherkreise zugleich auf derselben ansprechen zu lassen.

---

d) Ursachen der Konsonanz und Dissonanz.

Frage 1143. Was versteht man unter K o n s o n a n z e n und D i s s o n a n z e n?

Erkl. 1061. Im ersten Bande unserer Akustik haben wir das aus der Erfahrung abgeleitete Gesetz mitgeteilt, dass in der Musik die Intervalle, welche durch die Zahlen 1, 2, 3, 4, 5, 6 gegeben sind, konsonierend sind, während andere Töne, deren Verhältnis 8 : 9, 15 : 16 oder 15 : 8 ist, zusammen angegeben, dissonant sind. Nachdem wir in den vorstehenden Zeilen die S c h w e b u n g e n und K o m b i n a t i o n s t ö n e näher kennen gelernt haben, können wir jetzt auch den G r u n d der Konsonanz und Dissonanz kennen lernen.

Antwort. Das Zusammenklingen zweier Töne kann auf unser Ohr einen a n g e n e h m e n oder einen u n a n g e n e h m e n Eindruck ausüben. In dem ersteren Falle nennt man das Zusammenklingen der Töne oder den Akkord k o n s o n i e r e n d, im z w e i t e n F a l l e d i s s o n i e r e n d. Die Intervalle der konsonierenden Töne nennt man K o n s o n a n z e n, diejenigen der dissonierenden Töne hingegen D i s s o n a n z e n.

Frage 1144. Welches sind nach der Helmholtz'schen Theorie die U r s a c h e n d e r K o n s o n a n z u n d D i s s o n a n z?

Antwort. Die Grundlage der Helmholtz'schen Theorie der Konsonanz und Dissonanz ist der Satz, dass eine Klangmasse nur dann auf unser Ohr einen angenehmen Eindruck machen kann, wenn sie

Erkl. 1062. Früher glaubte man, dass man die Zahl der Schwebungen als solche nur vernehme, wenn sie langsam erfolgen, dass sie aber bei rascher Folge zu dem ersten Differenztone sich zusammensetzten. Helmholtz hat das Unrichtige dieser Ansicht nachgewiesen. 4, 8, 12 Schwebungen in der Sekunde können noch deutlich gezählt werden, wie sich zeigen läßt, wenn man zwei auf *a'* abgestimmte Gabeln oder gedeckte Orgelpfeifen verstimmt. Wird die Verstimmung immer mehr gesteigert, etwa bis zu einem Halbtone, wo die Zahl der Schwebungen 461—435 = 26 beträgt, so kann man dieselben nicht mehr einzeln unterscheiden, aber man empfindet sie als eine fortwährende Unterbrechung des Tonflusses, als eine Rauhigkeit, welche nach Helmholtz bei 30 bis 40 Schwebungen am unangenehmsten auf das Gehör wirkt; doch ist auch noch eine größere Zahl von Schwebungen in einem Intervall bei einiger Uebung zu erkennen, und wird deswegen auch von dem ungeübten Ohre empfunden; aber die Schwebungen werden immer undeutlicher, je größer ihre Zahl wird, weil unsere Empfindung durch eine zu große Zahl gleicher Einwirkungen in sehr kurzer Zeit für dieselben abgestumpft wird. Nach Helmholtz soll die Grenzzahl der wahrnehmbaren Schwebungen bei 132 in der Sekunde liegen.

Wenn wir die Zahl der Stöße durch Erweiterung des Intervalles vergrößern, durch Uebergang zu einem ganzen Tone z. B. *a'*—*h'* = 488—435 = 53 oder zu einer kleinen Terz *a'*—*c''* auf 517—435 = 82 bringen, so wird der Eindruck des intermittierenden Klanges immer schwächer, und bei der kleinen Terz ist kaum eine Spur desselben mehr wahrzunehmen, sie macht schon den Eindruck eines gleichmäßig abfließenden Tones. Konsonanz ist eine kontinuierliche, Dissonanz eine intermittierende Tonempfindung.

gleichmäßig abfließt, wenn die Töne nebeneinander bestehen ohne sich zu stören; dass dagegen eine Klangmasse einen unangenehmen Eindruck auf das Ohr macht, dass sie dissonant ist, wenn dieselbe aus einzelnen Stößen besteht, wenn es ein durch Schwebungen intermittierender Klang ist. Die Schwebungen können dabei so rasch erfolgen, dass wir uns der einzelnen nicht deutlich bewußt werden, dass wir sie nicht zählen können. Helmholtz vergleicht, um diesen Satz zu begründen, die Tonempfindungen mit den Lichtempfindungen, die ganz ähnliches bieten. Keine Beleuchtung macht auf das Auge einen unangenehmeren Eindruck als eine flackernde, bei welcher in rascher Folge der Lichtreiz stärker und schwächer wird. Ein knarrender, intermittierender Ton ist nun für die Gehörnerven ganz dasselbe, was ein flackerndes Licht für die Gesichtsnerven ist; es wird dadurch eine viel intensivere und unangenehmere Reizung des Organes bewirkt wie durch einen gleichmäßig dauernden Ton.

Schwebungen entstehen aber nicht allein durch das Zusammenklingen zweier nahe beisammen liegender Grundtöne, sondern auch durch die Obertöne untereinander und mit den Grundtönen, sowie durch die Kombinationstöne.

Die Dissonanz besteht somit in der Rauhigkeit des Zusammenklanges, welche bei Intervallen von verwickeltem Schwingungszahlenverhältnisse durch die schnellen Schwebungen der Grundtöne, der Obertöne und der Kombinationstöne erzeugt wird.

Die Konsonanz der Intervalle von einfachem Schwingungszahlenverhältnisse dagegen beruht darin, dass die Obertöne dieser Inter-

valle entweder ganz oder teilweise zusammenfallen und daher keine oder nur wenige und schwache Schwebungen hervorrufen.

Frage 1145. In welcher zweifachen Weise können wir die Anzahl der Stöße beim Zusammenklange zweier Töne beliebig steigern?

Antwort. Wir können die Anzahl der Stöße steigern, indem wir das Intervall der zusammenklingenden Töne immer mehr vergrößern, wir können aber auch unter Beibehaltung der Intervallbreite die Anzahl der Stöße vermehren, indem wir die beiden Töne um eine oder mehrere Oktaven erhöhen, wodurch ihre Schwingungszahlen verdoppelt, vervierfacht usw. werden. Ein Intervall also, das 4 Schwebungen macht, die nicht unangenehm sind, wird, in die dritthöhere Oktave verlegt, 32 Schwebungen geben und folglich als sehr rauh empfunden werden.

Die gleiche Zahl von Schwebungen wird in höheren Tonlagen schärfer und deutlicher empfunden, als in tieferen; deshalb sind Intervalle in hohen Lagen empfindlicher gegen kleine Abweichungen von der Reinheit ihrer Verhältnisse als in tiefen.

Je größer das Intervall bei gleicher Zahl von Schwebungen, um so weniger werden diese empfunden. Je tiefer die Lage eines und desselben Intervalles, um so geringer wird die Zahl der Schwebungen und um so größer dessen Rauhigkeit sein. Sehr hohe kleine Intervalle klingen wegen allzu großer Zahl der Schwebungen und sehr tiefe wegen zu geringer Zahl derselben weniger rauh als mittlere. Sehr tiefe Töne klingen schon für sich rauh, weil man häufig die einzelnen Schwingungen als Stöße empfindet, und weil sie mit ihren eignen Obertönen oder durch diese unter sich Schwebungen erzeugen.

Erkl. 1063. Leibnitz suchte die Ursache der Konsonanz durch die Vorstellung zu erklären, dass die Seele unbewußt die Schwingungszahlen zähle und an den einfachen Zahlenverhältnissen eine geheime Freude empfinde. Rameau und d'Alembert beobachteten, dass der Grundton meistens von den Obertönen Oktave, Duodezime und Terz der Oktave begleitet sei und sie sahen desshalb die Hinzufügung derselben Töne zu einem Grundtone als naturgemäß an. Smith Robert führte zuerst (1749) die Erklärung der Konsonanz und Dissonanz auf die Schwebungen der Obertöne zurück. Da aber seine Arbeit nicht beachtet und vergessen wurde, so haben wir Helmholtz als den Begründer der heute geltenden Theorie der Harmonie anzusehen. Aus dieser Theorie ergibt sich, dass alle engen Intervalle, z. B. große und kleine Sekunden innerhalb des in der Musik gebrauchten Tonsystems dissonierend sein müssen, sie erklärt, weshalb die Dissonanzen in den mittleren Tonlagen am schärfsten sind, und weshalb in den tieferen Tonlagen in der großen, sowie in der tieferen Hälfte der kleinen Oktave die kleinen Terzen schon merklich rauh klingen, da sie in diesen zwischen 15 und 30 Schwebungen geben.

Frage 1146. Wie erklärt es sich aus der Helmholtz'schen Theorie, dass nicht allein alle engen Intervalle, sondern auch die große und kleine Septime, sowie die verstimmten konsonierenden Intervalle der musikalischen Klänge dissonant sind?

Erkl. 1064. Intervalle, deren Primärtöne, sowie deren Obertöne entweder zusammenfallen oder so weit auseinander liegen, dass sie keine oder nur schwache Schwebungen verursachen, besitzen den größten Wohlklang, während die am wenigsten gut klingenden diejenigen sind, bei welchen viele oder alle Obertöne und außerdem die Primärtöne miteinander Schwebungen vollführen.

Nach der nebenstehenden Antwort müßten alle Intervalle von einfachen Tönen, wenn dieselben nicht gerade unter sich Schwebungen erzeugen, konsonant sein. Hier treten aber die Kombinationstöne statt der Obertöne auf. Da bei zusammengesetzten Klängen die ersten Differenztöne, auf die es hauptsächlich ankommt, in ihren Schwebungen mit den Obertönen

Antwort. Wir haben gesehen, dass die Klänge nicht einfache Töne, sondern Akkorde sind, aufgebaut aus dem Grundtone und seinen harmonischen Obertönen. Geradeso nun, wie die einfachen Töne Schwebungen hervorbringen, so tun es auch die Obertöne der Klänge miteinander und mit den Grundtönen, und außerdem können auch die Kombinationstöne Schwebungen veranlassen. Wenn deshalb zwei Klänge, welche wie fast alle in der Musik gebrauchten Klänge, deutliche Obertöne haben, unter diesen solche besitzen, welche hinreichend nahe zusammenliegen, so werden diese Schwebungen liefern und deshalb die beiden Klänge ein dissonantes Intervall bilden. Um hiervon ein klares Bild zu bekommen, wollen wir in der folgenden Uebersicht die zwei Grundtöne der Intervalle der c-Dur- und Moll-Tonleiter samt ihren Obertönen so zusammenstellen, dass immer die gleichen Töne untereinander stehen.

Intervalle	Grundton	Obertöne																				
		eingestrichene				zweigestrichene								dreigestrichene Oktave								
Prime	*c/c*	**c**		**g**		**c**		**e**		**g**		**b**		**c**		**d**		**e**		**fis**	**g**	
Sekunde	*c/d*		d		a		d		fis		a			**c**		**d**		**e**		**fis**	-	
Kl. Terz	*c/es*		es		b		es			**g**		**b**			des		es		f		**g**	
Gr. Terz	*c/e*		e		h			**e**			gis		h			**d**		**e**		**fis**	-	
Quarte	*c/f*		f			**c**			f		a			**c**			es		f		**g**	
Quinte	*c/g*			**g**			d			**g**			h			**d**			f		**g**	
Kl. Sexte	*c/as*				as		es				as			**c**			es			**ges**		as
Gr. Sexte	*c/a*				a			**e**			a			-	cis			**e**			**g**	
Septime	*c/h*				h				fis				h			-	dis			**fis**		a
Oktave	*c/c'*	**c**				**c**				**g**				**c**				**e**			**g**	

übereinstimmen, so verstärken die Schwebungen der Kombinationstöne die Dissonanzen und Konsonanzen und erzeugen sie, wo sie wegen Einfachheit der Töne eines Intervalls (z. B. bei gedeckten Pfeifen) nicht vorhanden sind.

Nach Appunn wirken auch die Summationstöne, und zwar besonders in der kleinen und eingestrichenen Oktave, da sie hier überwiegend stark sind; sie wirken dissonierend z. B. in dem Intervalle 8 : 5, da 13 zu beiden Tönen unharmonisch, konsonierend z. B. in dem Intervalle 6 : 4, da 10 zu beiden Tönen harmonisch ist.

Da in verschiedenen Klangfarben die Obertöne nach Zahl, Höhe und Stärke verschieden sind, so müssen auch die Konsonanzen und Dissonanzen auf verschiedenen Instrumenten verschieden klingen. In den Instrumenten (wie Pfeifen und Flöten), die einfache Töne und Klänge mit wenig Obertönen geben, klingen die Dissonanzen weich und mager, fast wie Konsonanzen; daher sind solche Instrumente in der modernen Musik, die reich an Dissonanzen ist, für sich allein unbrauchbar. Im Gegensatz hierzu werden Akkorde der obertönereichen Streichinstrumente leicht rauh und scharf.

Man erkennt hieraus sofort, dass die Sekunde eine Dissonanz sein muss, da ihre Grundtöne sowohl wie ihre fünf ersten Obertöne um das Intervall eines Ganz- oder Halbtones auseinander liegen; ebenso muss die Septime eine Dissonanz sein, da der erste Oberton *c'* des Grundtones *c* das Intervall eines Ganztones bildet, welchem in den Obertönen noch einige Halbtöne folgen.

Dementgegen erkennt man, dass die Oktave eine vollkommene Konsonanz sein muss, da die Obertöne der Oktave auch alle Obertöne des Grundtones sind, und deshalb keine anderen Schwebungen auftreten können wie in dem Klange des Grundtones selbst, Schwebungen, die erst sehr hohen Obertönen entsprechen, welche deshalb so schwach sind, dass sie nicht mehr gehört werden. Man sieht ferner, dass der erste Oberton der Quinte mit dem zweiten der Oktave zusammenfällt, und der folgende Oberton *d''* mit dem 4. und 5. des Grundtones im Verhältnis eines ganzen Tones steht. Es sind aber dabei ganz besonders die unteren Obertöne (bis etwa zum 6.) massgebend, weil sie durch ihre I n t e n s i t ä t hervorragen.

Frage 1147. In welcher Weise hat Helmholtz nachgewiesen, dass einfache (von Obertönen freie) Töne keine Dissonanz zu liefern vermögen, wenn störende Schwebungen weder zwischen Grund- noch Kombinationstönen auftreten können?

Antwort. Helmholtz hat durch Versuche an gedeckten Orgelpfeifen nachgewiesen, dass die verschiedenen Intervalle, die der Terz benachbart sind, durch den Zusammenklang z w e i e r e i n f a c h e n T ö n e gleichmäßig hergestellt werden können, o h n e d a s s e i n U n t e r s c h i e d d e s W o h l k l a n g e s s t a t t f i n d e t, wenn sie nicht einerseits der Sekunde oder andererseits der Quarte sich zu sehr nähern. Ebenso verhält es sich mit den der großen Sexte

Erkl. 1065. Der Wiener Akustiker Zellner hat durch angeblasene Flaschen (siehe Fig. 571) gezeigt, dass man von der großen Sexte zur kleinen, von der großen Terz zur kleinen übergehen

kann, ohne dass eine Veränderung des Wohlklanges zu bemerken wäre.

Mit Hilfe der Sternschen Tonvariatoren lassen sich solche Versuche leicht anstellen. Es sind dies Metallflaschen, welche durch einen über die Mündung hinstreichenden Luftstrom angeblasen werden, und deren verschiebbarer Boden die Einstellung auf Resonanz für eine kontinuierliche Folge von Tönen gestattet. An einer mit Teilung versehenen Scheibe kann man ablesen, welchen Ton die angeblasene Flasche gibt. Einem Grundtone von 800 Schw. entspricht als große und kleine Terz 5/4 . 800 = 1000 bezw. 6/5 . 800 = 960 Schw. Hier sind nach Wesendonk (Naturwissenschaftl. Rundschau, XX. Jahrg., No. 24) auch zwischen 800 und 960 durchaus keine Schwebungen von störender Intensität mehr vorhanden, und bei gleichmäßigem Tönen verschmelzen die Klänge ineinander wie bei Konsonanzen. Dasselbe beobachtet man bei der großen und kleinen Sexte (1150 und 1104 Schw.)

benachbarten Intervallen, auch diese zeigen keinen Unterschied, so lange sie der Quinte und Oktave fern genug bleiben. Tatsächlich sind an den offenen Orgelpfeifen nicht bloß die Schwebungen der unreinen Quinten und Quarten, sondern auch die der unreinen großen und kleinen Terzen leicht zu hören und lassen sich unmittelbar zum Stimmen der Pfeifen benutzen, was an gedeckten Pfeifen ohne Hilfe anderer Intervalle unmöglich ist. Wo die Obertöne nicht ausreichen, da treten die Kombinationstöne ein, um jede Unreinheit der konsonierenden Intervalle durch Schwebungen und rauhen Zusammenklang kenntlich zu machen. Nur für die ganz einfachen Töne fehlen uns hier noch die Bestimmungsmittel der Terzen, und auch die Schwebungen der unreinen Quinten und Quarten sind verhältnismäßig zu schwach, um auf das Ohr erheblich zu wirken, weil sie auf Kombinationstönen höherer Ordnung beruhen.

Erkl. 1066. Beim Aufsuchen der Kombinationstöne von Durdreiklängen findet man, dass dieselben nur Verstärkungen der Einzeltöne des Akkordes erzeugen; dagegen kommen durch die Kombinationstöne der Mollakkorde, durch die der ersten, noch mehr aber durch die der zweiten Ordnung Töne in den Akkord, die demselben ganz fremd sind und ihm daher etwas Unklares und Verschleiertes geben, worin das eigentümliche der Mollakkorde liegt.

Für die einfachen Töne der weiten gedeckten Orgelpfeifen geben nur die engen Intervalle der Sekunden eine durch starke Schwebungen charakterisierte Dissonanz. Unreine Oktaven, Septimen und Nonen, geben Schwebungen des ersten Kombinationstones. Die Schwebungen der verstimmten Quinten und Oktaven sind nur noch unter den günstigsten Bedingungen zu hören. Der Eindruck dissonanter Intervalle (mit Ausnahme der Sekunden) unterscheidet sich deshalb nur sehr wenig von dem der Konsonanzen, so dass der Hörer die Intervalle nicht mehr sicher zu unterscheiden vermag. Spielt man polyphone Kompositionen mit den kühnsten Dissonanzen auf dem gedackten Register der Orgel, so klingt fast alles gleichmäßig weich und wohl, aber deshalb auch unbestimmt, schwächlich und charakterlos.

Anmerkung XXXVI. 1) Die vollkommensten oder a b s o l u t e n Konsonanzen sind diejenigen, bei denen der Grundton des einen Klanges mit einem Partialtone des andern Klanges zusammenfällt. Dahin gehören die O k t a v e, D u o d e z i m e, D o p p e l o k t a v e usw.

2) Demnächst folgen die Q u i n t e und die Q u a r t e, welche wir als vollkommene Konsonanzen ansehen können, weil sie in jedem Teile der Tonleiter ohne erhebliche Störung des Wohlklanges gebraucht werden können. Die Quarte ist von beiden die unvollkommenere Konsonanz, sie nähert sich den Konsonanzen der folgenden Gruppe und erhält ihren Vorzug nur dadurch, dass sie in der Akkordbildung die Ergänzung der Quinte zur Oktave bildet.

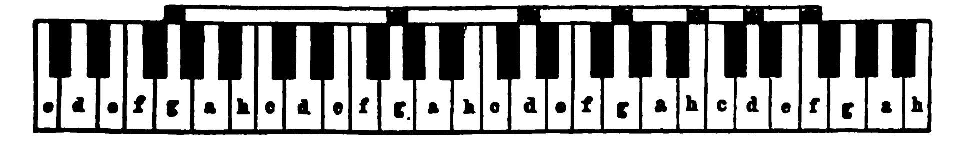
3) Die g r o ß e S e x t e und g r o ß e T e r z bilden die m i t t l e r e n Konsonanzen. Die Störung des Wohlklanges, welche in tiefen Lagen schon sehr merklich ist, verschwindet in hohen Lagen, weil die Schwebungen durch ihre größere Zahl sich verwischen. Jede kleine Verstimmung dieser Intervalle ruft deutliche Schwebungen der Obertöne hervor, und so sind beide Intervalle von allen benachbarten scharf geschieden.

4) Die k l e i n e T e r z und die k l e i n e S e x t e gehören zu den unvollkommenen Konsonanzen und sind meist nicht mehr selbständig bestimmt, weil die sie begrenzenden Obertöne in guten Klangfarben für die Terz oft, für die Sexte gewöhnlich fehlen, und deshalb kleine Verstimmungen dieser Intervalle nicht notwendig Schwebungen hervorbringen. Sie sind in tiefen Lagen noch weniger anwendbar als die große Sexte und große Terz und verdanken ihren Vorzug als Konsonanzen dem Umstande, dass sie notwendig sind in der Akkordbildung als Ergänzungen der großen Sexte und Terz zur Oktave oder Quinte.

5) Bei der Erweiterung der Intervalle um eine Oktave verbessern sich unter den genannten Intervallen die Quinte und die große Terz; schlechter werden Quarte und große Sexte, am schlechtesten die kleine Terz und Sexte.

Anmerkung XXXVII. Um für irgend einen Grundton die zugehörigen Obertöne schnell und leicht aufzufinden, bedient man sich am besten einer von E. Mach angegebenen Methode, darin bestehend, dass man sich das Bild einer Klaviatur derart anfertigt, dass die weißen und schwarzen Tasten am rückwärtigen Rande gleich breit sind. Geht man auf dieser Klaviatur um gleiche Abstände von links nach rechts weiter, so schreitet auch die m u s i k a l i s c h e Tonhöhe um gleiche Intervalle fort, während (bei gleichschwebender Temperatur, siehe I. Bd. S. 171) die Schwingungszahlen in geometrischer Reihe fortschreiten. Daraus folgt, dass der Abstand eines Obertones von seinem Grundtone auf der Klaviatur immer derselbe bleibt, wenn wir den Grundton beliebig wählen. Der erste Oberton wird immer um 12 Tastenbreiten, der zweite um 19, der dritte um 24 weiter nach rechts hin liegen als der Grundton, von dem man ausgehen will.

Fig. 628.



Fertigt man sich demnach eine verschiebbare Leiste, welche, wie in der nebenstehenden Figur angedeutet, am oberen Rande der Klaviatur verschoben werden kann, und welche an den Stellen der Obertöne mit schwarzen Feldern

bemalt ist, so braucht man nur das unterste mit 1 bezeichnete Feld auf den gewöhnlichen Grundton einzustellen, um sofort die ersten sechs Obertöne aufzufinden.

Anmerkung XXXVIII. Prof. Dr. F. Melde-Marburg gibt in Winkelmann's Handbuche der Physik, I. Bd. Seite 789 die folgende Zusammenstellung der Haupterscheinungen auf dem Gebiete des Zusammenklanges der Töne, welche besonders inbezug auf das Wesen der Kon- und Dissonanzen von der vorstehenden Theorie abweicht:

1) Eigentlich einfache Töne existieren kaum und erreichen wir dieselben nur möglichst annähernd in den Schwingungen von Stimmgabeln, wenn diese insbesondere vor entsprechenden Luftresonatoren stehen und ferner in den Tönen kugelförmiger Lufträume. Geräusche mischen sich aber auch hier häufig mit ein.

2) Die allermeisten tönenden Körper lassen gleichzeitig zwei oder mehr Töne erklingen, von denen einer als Haupton seiner Intensität nach hervortritt, und zu dem andere Töne sich leiser hinzugesellen.

3) Dieser Hauptton braucht keineswegs immer der Grundton zu sein, und es ist denkbar, dass bei einer Saite z. B. der dritte Oberton *g* der stärkste Ton ist, und dass zugleich der Grundton *c* ganz leise zum Mitschwingen veranlaßt wird.

4) Das, was wir „Klangfarbe" nennen, wird nach den Forschungen von v. Helmholtz hervorgerufen durch das gleichzeitige Zusammenklingen eines Haupttones mit leiseren Nebentönen oder Obertönen, meistens aber auch durch Hinzukommen von Geräuschen.

5) Das Wesen der sogen. „Kon- und Dissonanzen" dagegen besteht für unser Ohr, nach Melde's Ueberzeugung, ohne dass irgend ein dritter Ton zu den beiden primären Tönen in Betracht zu kommen braucht. Es muß daher nach dieser Ueberzeugung unstatthaft erscheinen, dass eine Lehre von den Kon- und Dissonanzen auf die Obertöne, Kombinationstöne und Stoßtöne gegründet werde. Kommen solche Töne zu den primären Tönen hinzu, so können diese selbstverständlich entweder im Sinne des Kon- oder Dissonierens wirken, und kann dann eine jede vollkommene Konsonanz zur Dissonanz werden, wenn zu ihr sich den Wohlklang störende Nebentöne beigesellen.

6) Die Bezeichnung „harmonische" Obertöne paßt nur für die Töne mit den Schwingungszahlen 1, 2, 3 und 5, sowie deren weiteren Verdoppelungen. Denn Alles, was mit diesen Zahlen sich zusammenstellen läßt, sind Töne des großen und kleinen Dreiklangs.

7) Eine Hauptstörung eines regelmäßigen Tones oder eines konsonierenden Zusammenklanges bilden die Stöße oder Schwebungen. Sie können durchs Zusammenwirken der primären Töne, also durch Interferenz entstehen, oder es können auch auf rein mechanische Weise solche Stöße erzeugt werden. Ihre Wirkung muß in beiden Fällen mehr oder weniger die einer Beimischung eines Rasselgeräusches sein. Zur Erklärung des inneren Wesens einer Kon- oder Dissonanz können aber nach Meldes Ueberzeugung auch nicht die Stöße herangezogen werden, denn eine sog. Dissonanz besteht sicherlich auch ohne jedes Vorhandensein von Stößen.

8) Die sogen. „Kombinationstöne" sind Töne, welche im Allgemeinen von den sogen. „Stoßtönen" verschieden sind, und auch auf verschiedene Weise erklärt werden müssen; jene nach der Theorie von v. Helmholtz, diese nach der Auffassung von Lagrange und der festen Begründung dieser Auffassung durch die Forschungen Rud. Königs.

III. Der Gehörsinn.

A. Das menschliche Gehörorgan.

a) Der Bau unseres Ohres.

Frage 1148. Was heißt „Hören", und welche Erfordernisse sind zum Hören notwendig?

Erkl. 1067. Der Gang der Schallstrahlen durch unsern Gehörapparat (der größtenteils im Schläfenbeine verborgen liegt), ist uns nicht so genau bekannt, wie z. B. der Gang der Lichtstrahlen im Auge, und es ist uns deshalb auch nicht ganz klar, auf welche Weise das Hören zustande kommt. Wie beim Auge, findet man übrigens auch im Ohre neben dem empfindenden Nerven einen physikalischen Apparat, welcher, nach akustischen Gesetzen gebaut, die Schallwellen sammeln, verstärken oder schwächen, und nach verschiedenen Richtungen hin ausbreiten kann.

Antwort. „Hören" heißt, eine schwingende Bewegung mittelst der Gehörnerven empfinden. Die Erfordernisse zum Hören sind, dass die Schwingungen tönender oder schallleitender Körper sich durch Luft, Wasser oder feste Körper bis zu unserem Gehörorgane fortpflanzen, und durch die richtige Beschaffenheit desselben, besonders durch gehörige Empfindlichkeit des Gehörnerven und normale Tätigkeit des Gehirns uns zur Wahrnehmung und Beurteilung gebracht werden.

Frage 1149. Der ganze Hörapparat zerfällt in wieviele und welche Hauptteile?

Erkl. 1068. Die menschlichen Gehörwerkzeuge befinden sich auf jeder Seite des Kopfes in dem sogen. Felsenbeine, dessen Form einer liegenden Pyramide ähnlich ist, deren Grundfläche mehr nach hinten und außen liegt, wogegen die Spitze nach vorn und innen gerichtet ist.

Antwort. Es zerfällt der ganze Hörapparat 1) in das äußere, 2) in das mittlere und 3) in das innere Ohr und enthält alle diejenigen Medien, durch welche sich der Schall überhaupt fortpflanzen kann. Am gewöhnlichsten geschieht diese Fortpflanzung von der Schallquelle aus nach unserem Ohre zunächst durch die atmosphärische Luft.

α) Das äussere Ohr.

Frage 1150. Welche Teile gehören zu der äußeren Abteilung des Gehörsinnes oder zu dem äußeren Ohre?

Antwort. Zu dem äußeren Ohre gehört zunächst der von Haut bedeckte Ohrknorpel, eine elastische Masse von der Gestalt einer Muschel, der sog. Ohrmuschel *m* (siehe Figur 629). Diese, hier und da von Muskelfasern bedeckte Knorpelplatte ist durch ihre Wurzel mit einem Knochen, dem Schläfenbeine verbunden, und mit mehreren Erhabenheiten und Vertiefungen (Leisten und Falten) versehen. An ihrem Rande wird dieselbe durch eine nach außen gerichtete Umbiegung *i*, die Ohrleiste begrenzt, welche eine mit ihr konzentrisch verlaufende Erhabenheit, die Gegenleiste *s* einschließt. Die Haut, welche den Ohrknorpel überzieht, verlängert sich nach unten in das knorpelfreie Ohrläppchen *l*, welches beim Durchstechen nur sehr wenig schmerzt und blutet und stark ausgedehnt werden kann. Die aus zwei Schenkeln entstehende Gegenleiste *s* endigt über dem Ohrläppchen in einem kleinen Vorsprunge *v*, welcher die Gegenecke genannt wird.

Die Ohrmuschel verengert sich nach dem Innern des Kopfes hin zu dem Gehörgange *g*. Die äußere Hälfte desselben, gewissermaßen mit dem Ohrknorpel zusammenhängend, ist knorpelig und bildet den knorpeligen Gehörgang, die innere Hälfte ist im Schläfenbeine befindlich und bildet den knöchernen Gehörgang. Beide Hälften sind durch Zellgewebe miteinander verbunden, und werden inwendig mit einer Fortsetzung der Haut des äußeren Ohres, welche auch das Trommelfell *t* überzieht, ausgekleidet. Das innerste Ende des knöchernen Gehörganges ist mit einem kreisförmigen Falze ver-

Erkl. 1069. Nach Savart dient das äußere Ohr zum Auffangen der Schallwellen, durch welche es dann zugleich in Schwingungen versetzt wird, und somit die verstärkten Wellen zum Trommelfell leitet. Die Querschnitte des Gehörganges sind elliptisch. Derselbe steigt zuerst aufwärts, dann wieder herab, dann wieder hinauf; sein Umfang ist so weit, dass man bei den meisten Individuen vermittelst hineinfallenden intensiven Lichtes das Paukenfell sehen kann. In der Haut des Trommelfells liegen zahlreiche kleine, den Schweißdrüsen ähnliche Drüsen, die Ohrenschmalzdrüsen, welchen die Absonderung des Ohrenschmalzes obliegt. Dieses ist eine bräunliche oder gelbe, klebrige, weiche

Fig. 629.



Masse, welche aus Fett, Pigmentkörnchen und Ueberresten der zerfallenen Drüsenzellen besteht. Bleibt es zu

lange im Gehörgange liegen, so verstopft es diesen und verursacht Schwerhörigkeit. (Siehe auch Antwort auf Frage 1237.)

Erkl. 1070. Versuche mit dem Hörrohre beweisen, dass zur Verstärkung des Schalles die Weite der die Schallwellen auffangenden Ohröffnung wenig oder gar nichts beiträgt, weit mehr dagegen das Vorhandensein von Krümmungen und Wölbungen, womit auch das äußere Ohr versehen ist. Dasselbe kann ohne merkliche Verminderung der Hörfähigkeit ganz fehlen, wie wir erproben können, wenn wir mit einem durchbohrten Brettchen unsere Ohrmuschel so an den Kopf drücken, dass das Bohrloch blos den Gehörgang freiläßt.

sehen, in welchem das Trommelfell t ausgespannt ist. Es ist dies eine dünne, faserige, elliptisch herzförmige, nach innen gewölbte, schräg nach außen und innen gerichtete Haut, die auf der Innenseite von einer zarten Schleimhaut der Paukenhöhle p bedeckt ist. Die Außenfläche des Trommelfells gehört dem äußeren, die Innenfläche dem mittleren Ohre an. Die zwischen beiden liegende mittlere Haut des Trommel- oder Paukenfelles enthält mehrere, vom Umfange nach dem Mittelpunkte strahlende Fasern, welche muskelartig und vorzüglich an der inneren Seite sichtbar sind. In der Mitte ist dasselbe nabelförmig eingezogen, wodurch es (wie Helmholtz nachgewiesen hat) besonders stark und leicht von verschiedenen Tönen in Mitschwingungen versetzt werden kann, während flach gespannte Membranen, wie das Kalbfell der Trommeln, je nach ihrer Größe und Spannung (gespannten Saiten entsprechend), wesentlich nur für einen Ton abgestimmt sind.

Durch größere Beschädigung des Trommelfelles, sowie durch gänzliches Fehlen desselben wird die Hörweite eingeschränkt, aber das Hörvermögen nicht aufgehoben. Ferner ist nachgewiesen, dass Ohren mit durchlöchertem Trommelfell tiefere Töne weniger, dagegen sehr hohe Töne oft besser wahrnehmen als ein ganz unverletztes Ohr.

β) Das mittlere Ohr.

Frage 1151. Welche Teile umfaßt das auf das äußere Ohr folgende mittlere Ohr?

Erkl. 1071. „Das in die Paukenhöhle übergehende Ende der Tuba (so genannt, weil ihre gegen den Schlund

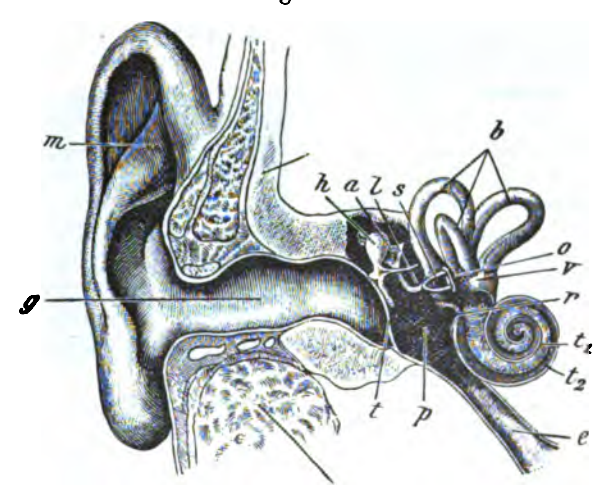
Antwort. Die mittlere Abteilung unseres Gehörsinnes wird gebildet durch die Trommel- oder Paukenhöhle p, welche sich unmittelbar hinter dem Trommelfell befindet, eine länglich run-

gekehrte Oeffnung wie das Ende einer Trompete erweitert ist, während die Mitte der Röhre sehr eng ist), ist aus Knochen gebildet, das gegen den Schlund gekehrte erweiterte Ende dagegen aus einer dünnen, biegsamen Knorpelplatte, welche längs der oberen Seite gespalten ist. Die Ränder der Spalte sind durch eine sehnige Membran geschlossen. Man kann durch die Tuba Luft in die Trommelhöhle eintreiben oder herausziehen, wenn man Nase und Mund verschließt, und die Luft im Munde entweder zusammenpreßt oder durch Saugen verdünnt. Sowie die Luft in die Trommelhöhle ein-

de, unregelmäßige Form besitzt, und mit Luft angefüllt ist. Diese Höhle liegt im Felsenteile des Schläfenbeines und ist mit einer äußerst feinen Haut überkleidet, welche die Fortsetzung der Schleimhaut der Rachenhöhle bildet. Es läuft nämlich von der Trommelhöhle ein beinahe 5 cm langer Kanal, die Eustachische Röhre oder Tuba *e*, sich nach und nach erweiternd, nach dem Schlunde und öffnet sich dort dicht an der hinteren Nasenöffnung. Diese Ohrtrompete ist von einer Fortsetzung der Schleimhaut



Fig. 630.



tritt oder von ihr austritt, fühlt man ein plötzliches Rucken im Ohre und hört ein Knacken. Dabei wird man bemerken, dass die Luft nur in solchen Augenblicken vom Schlunde in das Ohr oder vom Ohre in den Schlund tritt, wo man eine Schlingbewegung macht. Ist die Luft in das Ohr eingedrungen, so bleibt sie darin, auch wenn man nun Mund und Nase wieder öffnet, bis man eine Schlingbewegung macht. Bei letzterer tritt sie aus, was sich dadurch zu erkennen gibt, dass ein neues Knacken eintritt, und das Gefühl der Spannung im Trommelfell, was so lange bestand, nun aufhört. Es folgt aus diesen Ver-

des Schlundes ausgekleidet und dient zur Erhaltung des Gleichgewichts in der Spannung der äußeren Luft und derjenigen, welche sich in der Paukenhöhle befindet, und zugleich können die in der Paukenhöhle abgesonderten Flüssigkeiten hierdurch einen Ausweg finden. (Siehe Erkl. 1071).

In der Trommelhöhle befinden sich zarte, bewegliche und wie Hebel aufeinander wirkende Knöchelchen, durch welche die dem Trommelfell mitgeteilten Schwingungen dem inneren Ohre oder dem

suchen, dass die Tuba für gewöhnlich gar nicht offen ist, sondern nur beim Schlingen geöffnet wird, was sich dadurch erklärt, dass die Muskeln, die das Gaumensegel heben und beim Schlingen in Tätigkeit gesetzt werden, zum Teil von dem knorpeligen Ende der Tuba entspringen. Für gewöhnlich ist also die Paukenhöhle ganz geschlossen, mit Luft gefüllt, und der Druck dieser Luft bleibt dem der atmosphärischen Luft gleich, da er von Zeit zu Zeit während der Schlingbewegungen Gelegenheit hat, sich mit diesem auszugleichen." (Helmholtz.)

Labyrinthe zugeführt werden. Diese Gehörknöchelchen (die kleinsten im menschlichen Körper) sind der Hammer, der Amboß, mit welchem ein kleines linsenförmiges Knöchelchen (das Linsenbein des Sylvius) schon in der frühesten Lebensperiode verwachsen ist, und der Steigbügel.

Frage 1152. Warum wird Leuten, welche sehr heftigen Schallen ausgesetzt sind (z. B. Artilleristen) empfohlen, den Mund offen zu halten?

Erkl. 1072. Obschon die Gehörknöchelchen die normalen Schallleiter zwischen äußerem und innerem Ohre sind, so findet erfahrungsmäßig bei einer Unterbrechung ihres Zusammenhanges doch noch ein Hören statt, weil der Steigbügel die Schwingungen der Trommelfellluft aufnimmt und nach dem ovalen Fenster leitet. Auch wenn Hammer und Amboß fehlen, hören wir dennoch alles, wenn auch undeutlich und verworren; ist dagegen der Steigbügel nicht frei beweglich, sondern mit dem ovalen Fenster verwachsen, so wird dadurch ein hoher Grad von Schwerhörigkeit bewirkt.

Antwort. Der Sinn dieser Vorschrift ist der, dass bei offenem Munde die Luft in der Rachenhöhle eben so stark erschüttert wird wie im äußeren Gehörgange, die Wirkung beider Erschütterungen auf das Trommelfell sich also ausgleichen muß. Träte diese Ausgleichung nicht ein, so könnte es leicht zur Zerreißung des Trommelfelles kommen, sobald es durch den heftigen Schall zu stark nach einwärts getrieben wird. Wird die Eustachische Röhre undurchlässig, so kann in der Paukenhöhle ein luftleerer Raum entstehen und durch den Druck der äußeren Luft die Schwingungsfähigkeit des Trommelfelles aufgehoben werden. Die hierdurch entstehende Taubheit kann dadurch beseitigt werden, dass man eine kleine Oeffnung in dem Trommelfell anbringt.

Frage 1153. Welche Form hat der Hammer *h*, (F. 630) und welche Teile unterscheidet man an demselben?

Antwort. Der Hammer liegt dem Trommelfell am nächsten und hat die Form einer Keule mit zwei Griffen, von denen der eine an das Trommelfell angewachsen ist (s.

Fig. 631.

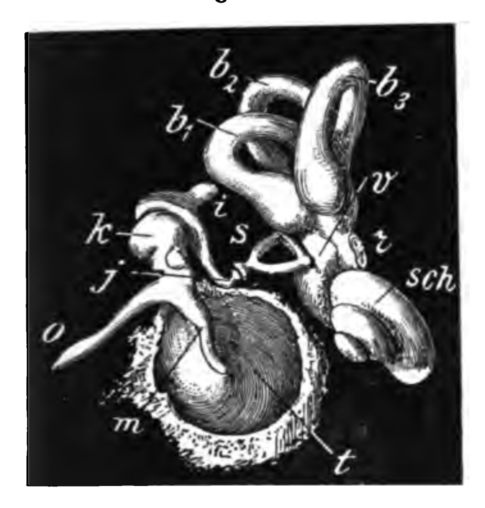


Fig. 632.



Fig. 631). Im einzelnen unterscheidet man an dem Hammer

1) den Kopf *k*, (F. 631 u. 632), d. i. das obere dickere, fast kugelförmig abgerundete Ende, welches den Hammer mit dem Ambosse durch ein Gelenk verbindet.

2) den Hals *c*, mit einem oberen längeren *o* und einem unteren kürzeren Fortsatze *n*; ersterer ist bei den Bewegungen des Hammers als dessen Drehpunkt anzusehen, indem er den Hammer in einer Knochenspalte der Trommelhöhle befestigt.

3) den Handgriff oder Stiel *m* des Hammers, welcher mit dem Trommelfell fest zusammenhängt, indem er zwischen die innere und mittlere Hautschicht desselben hineingeschoben ist; sein Ende liegt in der Mitte des Trommelfelles und zieht dieses so nach einwärts, dass dadurch ein nach außen konkaver, nach innen konvexer Nabel des Trommelfelles entsteht. (Siehe Fig. 630.)

Frage 1154. Was ist über die Form und über die Teile des Ambosses *a*, (Fig. 630) zu bemerken?

Antwort. Der Amboss, etwas kleiner als der Hammer, ähnelt einem zweiwurzeligen Backenzahne, dessen Wurzeln annähernd rechtwinklig auseinandertreten. Derselbe besteht:

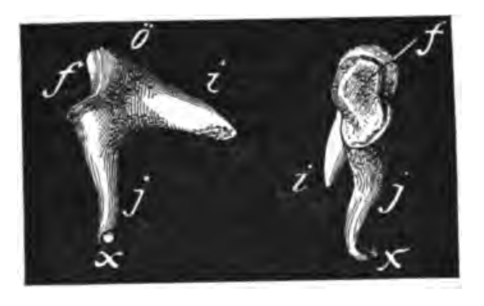
1) aus dem mittleren Teile, dem breiteren und dickeren Körper *ö* (Fig. 633); derselbe ist ungefähr viereckig plattgedrückt, und vorn mit einer vertieften Gelenkfläche *f* versehen, wodurch der Amboß mit der Gelenkfläche *f* (Fig. 632) des Hammers verbunden ist.

2) aus der langen Wurzel, dem langen Fortsatze *j* oder dem

Erkl. 1073. Das Gelenk zwischen Hammer und Amboß bildet eine unregelmäßige sattelförmige Flächenkrümmung und ist so eingerichtet, dass, wenn der Hammer mit seinem Stiele nach innen gezogen wird, er den Amboß ganz fest packt und mitnimmt. Umgekehrt, wenn das Trommelfell mit dem Hammer nach außen getrieben wird, braucht der Amboß nicht mitzugehen. Die Folge davon ist, dass, wenn Luftverdünnung im Gehörgange ein-

tritt, der Steigbügel nicht mitgerissen wird, während bei eintretender Luftverdichtung durch die Spannung des trichterförmig eingezogenen Trommelfelles die Bewegung des Hammers nach innen gehemmt wird.

Fig. 633.



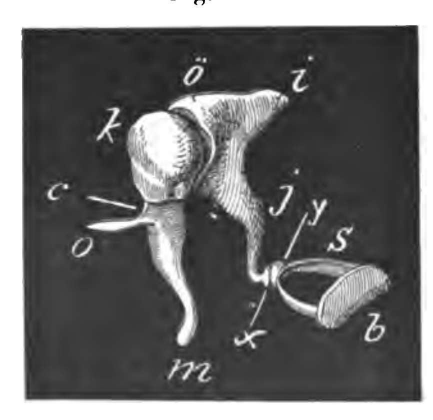
heruntersteigenden Schenkel, woran das rundliche Knöchelchen x des Silvius in einer rundlich ausgehöhlten Fläche befestigt ist.

3) aus der kurzen Wurzel, dem kurzen Fortsatze oder dem Querschenkel i, dessen Spitze durch eine kurze Bandmasse und ein unvollständig ausgebildetes Gelenk mit der hinteren Wand der Paukenhöhle verbunden und bei den Bewegungen als Drehpunkt des Ambosses anzusehen ist.

Frage 1155. Das rundliche Knöchelchen des Sylvius verbindet den heruntersteigenden Schenkel des Ambosses mit dem Köpfchen y des Steigbügels s (siehe Fig. 634 und 631). Welche Teile unterscheidet man an letzterem?

Erkl. 1074. Bei normal einwärts gezogenem Trommelfell drückt der Amboß auf den Steigbügel. Jede verstärkte Eintreibung des Hammers vom Trommelfell aus bewirkt auch eine stärkere Eintreibung des Steigbügels in das ovale Fenster, wobei aber der obere et-

Fig. 634.



Antwort. Am Steigbügel, welcher die Gestalt hat, die sein Name andeutet, unterscheidet man 1) das nach außen gehöhlte Köpfchen y, welches mit dem rundlichen Knöchelchen des Sylvius verbunden ist und aus einem zusammengedrückten, länglichrunden Knochenteile besteht, der nur selten durch einen eingeschnürten Hals von den beiden Schenkeln getrennt ist.

2) Die zwei Schenkel, welche inwendig mit einer Furche versehen sind, worin eine feine Membran, eine Fortsetzung der Paukenhaut ausgespannt ist.

3) Die länglich-runde Grundfläche oder Basis b des Steigbügels hat ganz die Form des ovalen Fensters (siehe Antwort auf Frage 1156), womit sie durch die Schleimhaut der Paukenhöhle beweglich verbunden ist, und kann, als etwas kleiner, durch diese Oeffnung in und aus dem Vorhofe (siehe Antwort auf Frage 1159)

was losere Rand seiner Fußplatte sich stärker verschiebt als der untere, und daher das Köpfchen sich etwas hebt, welcher Bewegung auch wieder eine schwache Hebung der Spitze des langen Amboßfortsatzes entspricht.

Die Schwingungsweite des Steigbügels beträgt nicht über 1/10 mm, während die freie Bahn des Hammerstieles mindestens neunmal so groß ist.

treten. Die innere, dem Fenster zugewandte Seite ist flach, die äußere vertieft und von aufgeworfenen Rändern umgeben.

Frage 1156. Durch welche, zum mittleren Ohre gehörigen Organe wird die zur Aufnahme der Schallschwingungen der Luft erforderliche Spannung des Trommelfelles erzielt, welche bald eine erhöhte, wie beim Lauschen, bald eine verminderte, wie während des Schlafes sein kann?

Erkl. 1075. Der Trommelfellspanner bedarf keines Gegenmuskels; das, was man früher als Erschlaffer des Trommelfelles bezeichnete, ist kein Muskel, sondern nur ein Band. Nach Helmholtz können die drei Gehörknöchelchen nur als ein Ganzes schwingen, die Schwingungen des Trommelfelles pflanzen sich fast augenblicklich auf das Labyrinthwasser fort, und alle Teile des ganzen Systems sind stets in einer gleichen Schwingungsphase begriffen. Dem Spannmuskel des Trommelfelles und dem Steigbügelmuskel schreibt Helmholtz die Aufgabe zu, die Befestigungsbänder der Gehörknöchelchen straff zu spannen und dadurch die Kette der Gehörknöchelchen gleichsam in ein starres System zu verwandeln. Die Gelenke der Gehörknöchelchen aber scheinen hauptsächlich dazu zu dienen, dass sie alle ausgiebigeren Bewegungen des Trommelfelles möglich machen, ohne dass dadurch die Verbindung des Steigbügels mit dem ovalen Fenster zerstört würde.

Fig. 635 zeigt das Trommelfell und die Gehörknöchelchen von i n n e n her gesehen, in natürlicher Größe, und

Antwort. Die zum Hören erforderliche Trommelfellspannung wird erzielt durch die Beschaffenheit der Membran selbst und durch den Handgriff *m* des Hammers (Fig. 631), dessen Spitze die Mitte des Trommelfelles nach einwärts zieht. Die Spannung wird vergrößert durch einen Muskel, den sog. T r o m m e l f e l l s p a n n e r *m* Fig. 635. Die lange Sehne dieses Muskels wendet sich aus dem Kanale, in welchem der Muskel verläuft, rechtwinklig gegen das Trommelfell und setzt sich am oberen Teile des Hammerhandgriffes an. Der Muskel zieht das Trommelfell nach einwärts; diesem Zuge folgen die Gehörknöchelchen, welche näher aneinander rücken, somit tritt der Fußtritt des Steigbügels tiefer in das ovale Fenster hinein, wodurch der Druck auf die Membran desselben, sowie auf das Wasser des Labyrinths vermehrt und damit die Schallfortpflanzung eine intensivere wird. Der Steigbügelmuskel spannt ebenfalls die Membran des ovalen Fensters, insofern er den hinteren Teil der Fußplatte des Steigbügels stärker an die Membran drückt. Beim Erschlaffen dieser Muskeln kehren der Hammerhandgriff und das Trommelfell nur durch elastische Kräfte wieder in die Gleichgewichtslage zurück (siehe Erkl. 1075), die Gehörknöchelchen tre-

zwar ist *f* das aufgebrochene Felsenbein, *k* der Hammerkopf, *a* der Amboß, *s* die Paukensaite, *t* das Trommelfell und *m* der Spannmuskel des Trommelfelles.

Fig. 635.



ten weiter auseinander, wodurch die Fortpflanzung des Schalles eine schwächere wird. Durch die so ermöglichte stärkere oder schwächere Spannung des äußeren oder großen Trommelfelles, sowie des inneren oder kleinen Trommelfelles des ovalen Fensters wird zugleich das Gehör für höhere, ein andermal für tiefere Töne in gesteigertem Maße empfänglich. Es ist dies also eine Art von Anpassung oder Akkommodation des Ohres.

γ) Das innere Ohr.

Frage 1157. Gleichwie durch das äußere oder große Trommelfell die Schalleindrücke vom äußeren Ohre auf das mittlere übertragen werden, so geschieht die Weiterleitung der Schallwellen von dem mittleren nach dem inneren Ohre durch welche Organe?

Erkl. 1076. Im übrigen ist das innere Ohr eine in das Felsenbein eingesenkte, von Knochenwänden rings umschlossene längliche Höhlung, zu welcher außer den beiden genannten Fenstern (abgesehen von den Eintrittsstellen des Gehörnerven) keine sonstige Oeffnung führt. Diese Höhlung ist aus so verwickelten Gängen und Windungen zusammengesetzt, dass man ihr den Namen Labyrinth gegeben hat.

Wird der Steigbügel gegen das ovale Fenster gedrückt, so wird das die ganze Labyrinthhöhle ausfüllende Labyrinthwasser gegen die Membran des runden Fensters gedrängt und dadurch die Schallintensität gesteigert.

Antwort. Diese Schallübertragung vom mittleren nach dem inneren Ohre geschieht durch zwei kleine Oeffnungen, die mit feinen elastischen Häutchen, die in gewissem Sinne dem Trommelfell ähnlich sind, verschlossen sind. Dieselben werden bezeichnet als das ovale oder Vorhoffenster *o* und das runde oder Schneckenfenster *r*; die letzteren Namen bezeichnen den Ort (Vorhof oder Schnecke), wo die betreffenden Oeffnungen in das Labyrinth münden. Dem ovalen Fenster *o* und somit der Platte des Steigbügels gerade gegenüber mündet ein Zweig des Gehörnerven in den Vorhof ein. Das runde Fenster *r* ist nur durch eine Membran geschlossen. (Siehe die Figuren 631 und 636.)

Frage 1158. Was ist über die Lage und die sonstige Beschaffenheit der innersten und wichtigsten Abteilung unseres Gehörorganes,

Antwort. Das nach seinen verschieden gekrümmten Höhlungen benannte Labyrinth befindet

welches den Namen **L a b y r i n t h** (siehe Erkl. 1077) trägt, zu bemerken?

sich oberhalb der Trommelhöhle etwas weiter nach hinten und ist von einer außerordentlich harten und dichten Knochenmasse des Felsenbeines umgeben, so dass nur zwei nachgiebige Stellen der Wand übrig bleiben, nämlich die beiden vorerwähnten Fenster. Dasselbe ist mit einer Knochenhaut überkleidet, die eine Fortsetzung der harten Hirnhaut ist. Es ist ganz mit einer wässrigen Flüssigkeit, dem L a b y r i n t h w a s s e r angefüllt, in welchem sich die Gehörnerven in mancherlei Häuten und Fasern verbreiten, wodurch sie weit mehr geschützt sind, als wenn sie etwa mit Luft umgeben wären, und jeden Eindruck der dieser Flüssigkeit durch den Schall mitgeteilten Bewegungen stärker empfinden können. Diese wässrige Feuchtigkeit wird von feinen Arterien, welche auf der Oberfläche des Labyrinths endigen, abgesondert, und durch den Wasserleiter des Vorhofs und den Wasserleiter der Schnecke wieder in den Kreislauf des Blutes zurückgeführt. Man unterscheidet das h ä u t i g e und das dasselbe umgebende k n ö c h e r n e Labyrinth.

Fig. 636.



Frage 1159. Welches sind die einzelnen Teile des Labyrinths?

Antwort. Die Teile des Labyrinths sind

1) der V o r h o f *v*, d. i. die ziemlich weite mittlere Partie *v* (Fig. 636 des Labyrinthhohlraumes,

2) d r e i B o g e n g ä n g e oder halbzirkelförmige Kanäle *b*, *b*, welche nach hinten und außen gerichtet sind und

3) die nach hinten und außen liegende Schnecke *sch*.

Frage 1160. Was ist über die Form und Beschaffenheit des V o r h o f s zu bemerken?

Antwort. Der Vorhof ist eine unregelmäßig gestaltete, fast eiför-

Erkl. 1077. Mit dem ägyptisch-griechischen Worte Labyrinth wurde ursprünglich ein verwickelter Bau mit sich kreuzenden Gängen, vielen Kammern und nur einem oder wenigen Ausgängen, so dass man sich schwer herausfinden konnte, bezeichnet; dann bezeichnete das Wort eine ähnliche Gartenanlage, einen Irrgarten.

Erkl. 1078. Vergleichen wir die Größe des äußern Trommelfells mit der Größe des das ovale Fenster verschließenden innern Trommelfells, so ergibt sich hieraus der mechanische Nutzen des Trommelhöhlenapparates, welcher darin besteht, dass die Schallbewegung von der verhältnismäßig ausgedehnten Fläche des Trommelfelles von 9—10 mm vertikalem und 7,5—9 mm horizontalem Durchmesser aufgefangen und durch die Gehörknöchelchen auf die verhältnismäßig viel kleinere Fläche des ovalen Fensters übertragen wird, deren Durchmesser nur 1,5—3 mm beträgt, Somit werden die Schwingungen des 15 bis 20mal so großen Trommelfelles auf die Membran des ovalen Fensters mit entsprechend gesteigerter Intensität übertragen.

mige Höhle, welche durch eine feine Knochenleiste unvollkommen in zwei Abteilungen von ungleicher Größe getrennt ist, in die halbkugelförmige, welche nach unten und vorn gelegen und gegen die Schnecke gekehrt ist, und die halbeiförmige, welche sich nach oben und hinten befindet und bis an die halbzirkelförmigen Kanäle geht, wovon zwei in einen gemeinschaftlichen Schenkel *g* (Fig. 636) zusammenlaufen. Ferner bemerkt man im Vorhofe neben den beiden vorerwähnten Fenstern fünf Oeffnungen der drei halbzirkelförmigen Kanäle und noch verschiedene kleine Oeffnungen für hindurchgehende Nerven und Gefäße, sowie die Verbreiterungen des Gehörnerven.

Frage 1161. Was ist über die halbzirkelförmigen Kanäle zu bemerken?

Erkl. 1079. Man hat die halbzirkelförmigen Kanäle als Dämpfungsapparate der Wellenbewegung des Labyrinthwassers angesehen, indem die gleichzeitig in beide Oeffnungen eines solchen Kanals eintretenden gleichartigen Schallwellen sich in der Mitte des Kanals begegnen und also ihre Bewegung gegenseitig aufheben müssen. Andere Physiologen erblicken in den halbzirkelförmigen Kanälen ein Sinnesorgan für das Gleichgewicht des Kopfes und des Körpers überhaupt, da man gefunden haben will, dass nach ihrer künstlichen Entfernung Tiere sich nicht mehr in geordneter Weise zu bewegen vermögen.

Antwort. Die halbzirkelförmigen Kanäle bestehen aus drei *C*-förmigen knöchernen Röhren, welche etwas mehr als einen Halbkreis bilden, ein wenig platt gedrückt und ungleich weit sind. Sie treten mit einer weiten Oeffnung aus dem Vorhofe und kehren mit einer zweiten engeren dahin zurück. Die Anfangsmündung erweitert sich bei jedem der drei im Querschnitt ovalen Gänge zu einer ovalen, Ampulle genannten kleinen Höhle (*a*, *a*, *a*, Fig. 636) dann verengern sich die Gänge wieder und münden, indem zwei von ihnen, der obere und der untere, kurz vor ihrem Eintritt in den Vorhof zu einer gemeinsamen Endröhre *g*

Indessen ist gerade in der allerjüngsten Zeit gezeigt worden, dass wenigstens Haifische die völlige Herausnahme aller Kanäle ohne jegliche Störung vertragen. Die Zerstörung der häutigen Bogengänge des Labyrinths hat auf das Gehörvermögen keinen erheblichen Einfluß; die Zerstörung der Schnecke dagegen vernichtet das Gehör vollständig. Es ist aber schon seit langer Zeit bekannt, dass Verletzungen des häutigen Labyrinths Gehörschwindel verursachen.

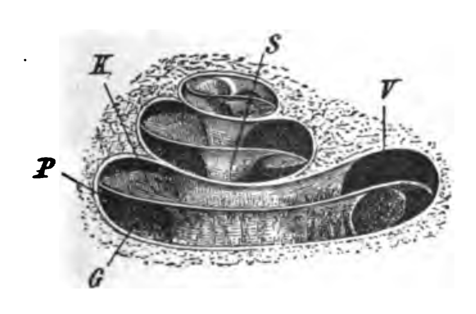
verschmelzen, mit nur zwei Endöffnungen in den oben erwähnten länglich ovalen Raum des letzteren. Die Länge der drei Bogengänge ist etwas verschieden. Der oberste von diesen Bogengängen, oder der vordere halbzirkelförmige Kanal und der hintere innere haben eine senkrechte Richtung; der hintere äußere liegt fast horizontal.

Frage 1162. Was ist schließlich über die Form und innere Einrichtung der Schnecke zu bemerken?

Antwort. Die Schnecke, in ihrer Form dem Gehäuse einer Landschnecke ähnlich, ist ein knöcherner konischer Kanal, der in 2½ immer enger werdenden Spiralgängen schraubenförmig um eine, bis zur Hälfte des zweiten Gewindes gehende konische Spindel *s* (Fig. 637) herumgeht. Man unterscheidet an derselben die Grundfläche und die Spitze. Der innere Hohlraum des Schneckenganges wird durch eine, an der Spindel befestigte dünne, ebenfalls spiralig gewundene Scheidewand in zwei Hälften geteilt, die man Treppen nennt. Die untere, der Basis nähere Paukentreppe steht durch das mit dem sekundären oder inneren Trommelfell verschlossene runde Fenster mit der Paukenhöhle, die obere, die Vorhofstreppe aber mit dem oben erwähnten rundlichen Abschnitte der Vorhofshöhle in Verbindung. Beide Treppen, *P* und *V*, sind durch die dazwischen befindliche Scheidewand so gesondert, dass sie sich erst über der Spitze der Spindel, unter der Wölbung der Decke, die man die Kuppel nennt, durch eine Oeffnung, das Schneckenloch, miteinander vereinigen, so dass die in den Treppen enthaltene Flüssigkeit von einer Treppe zur andern übertreten kann.

Erkl. 1080. Die Reißnersche Membran *R* ist zart, wenig Widerstand leistend, die Grundmembran *G* ist dagegen eine feste, straff gespannte, elastische Membran, die in radialer Richtung, ihren starken Radialfasern entsprechend, gestreift ist. Auf der Grundmembran

Fig. 637.

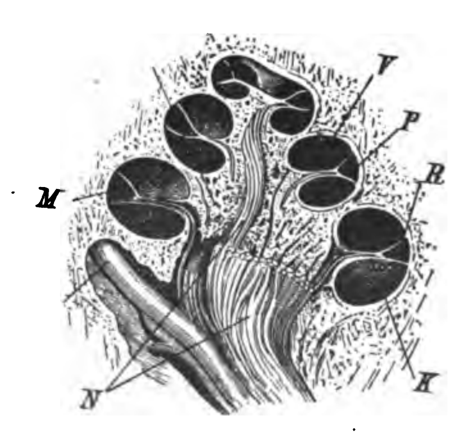


sind die Enden des Schneckennerven und deren Anhänge befestigt. Werden das Paukenfell und mit ihm die Gehörknöchelchen durch gesteigerten Luftdruck im Gehörgange nach innen getrieben, so drückt die Fußplatte des Steigbügels auf das ovale Fenster, und dieser Druck pflanzt sich durch das Labyrinthwasser nach der nachgiebigen Membran des runden Fensters hin fort.

Somit muß das Labyrinthwasser entweder durch das Schneckenloch von der Vorhofs- zur Paukentreppe fließen, oder, da hierzu wahrscheinlich die Schallwellen zu schnell aufeinander folgen, muß die membranöse Scheidewand der Schnecke gegen die Paukentreppe hindrängen. Das Umgekehrte muß geschehen bei eintretender Luftverdünnung im Gehörgange. Auf solche Weise werden also die Schallschwingungen der Außenwelt auf die Membranen des Labyrinths, namentlich auf die Schneckenmembrane und die dort ausgebreiteten Nerven übertragen.

Erkl. 1081. Die vorstehende Figur 637 stellt die knöchernen Teile einer aufgebrochenen Schnecke dar, die folgende Figur 638 einen Querschnitt des Schneckenganges und Fig. 639 den Querschnitt einer Schneckenwindung vergrößert. In allen drei Figuren bezeichnet *K* das knöcherne Spiralblättchen, *P* die Paukentreppe, *V* die Vorhoftstreppe, *G* das häutige Spiralblättchen oder die Grundmembran, *S* die Schneckenspindel, *M* die Mitteltreppe, *N* den Schneckennerv, *R* die Reißner'sche Membran.

Fig. 638.

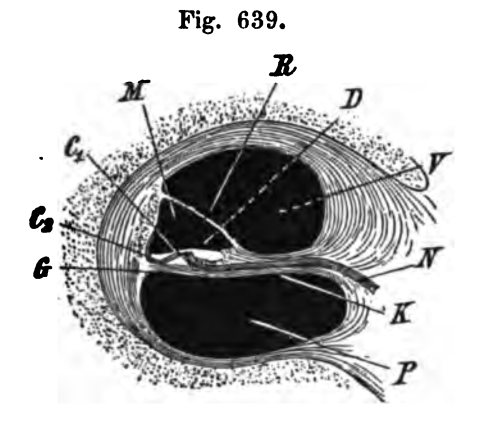


Die Scheidewand ist zunächst der Spindel knöchern, und wird das Spiralblatt oder das gewundene Blatt genannt. Es besteht aus zwei Knochenblättchen, wovon das eine, nach der Trommeltreppe zu liegende mit knöchernem Fadengewebe und hervorragenden Linien besetzt ist, das andere aber nach der Vorhoftreppe zu ganz glatt ist. Es reicht nicht bis an die Spitze der Schnecke, sondern endigt etwas unter der Hälfte des zweiten Spiralganges in einem Haken; von diesem Ende bis zur obersten Decke der Schnecke bleibt ein trichterförmiger Raum, der Trichter genannt (s. Fig. 637).

Das knöcherne Spiralblatt *K* (Fig. 638) reicht nicht bis zur gegenüberstehenden Wand des Schneckenganges, sondern es wird die vollkommene Trennung der beiden Treppen erst durch eine, aus zwei Blättern bestehende Membrane bewirkt, die zwischen sich einen Kanal, die sogen. Mitteltreppe *M* bilden, in welchem die in die Treppenspindel eintretenden, und sich von da aus verbreitenden Nervenfasern *N* endigen. Das obere, im Rohre der Vorhofstreppe schräg aufwärts gespannte Blatt ist die sogen. Reißnersche Membran *R*, deren eigentlichen Zweck man nicht recht kennt. Die untere Membran heißt die Grundmembran *G* (s. Fig. 639), und auf ihr befindet sich das sogen. Deckblatt *D*, sowie jene Gebilde und elastischen Stäbchen C_1 und C_2, die nach ihrem Entdecker das Cortische Organ benannt werden.

Durch die Furchen und Zwischenräume des Spiralblattes geht die Substanz des Gehörnerven *N* (Fig. 638 und 639) teils ästig, teils in spiralförmig liegenden Fasern, und endet am Rande der weichen Zone in unzählig viele pinselartig geordnete zarte Fäden.

Fig. 639.

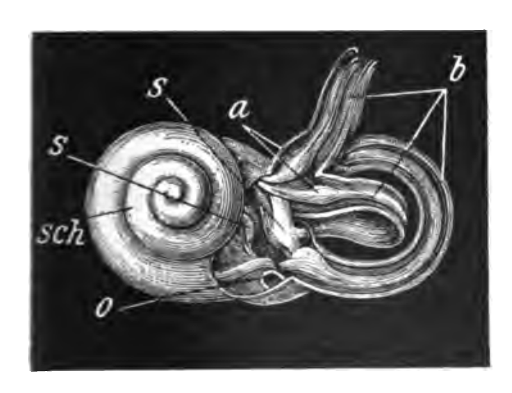


Die häutige Scheidewand ist keine einfache Membran, sondern selbst ein häutiger Kanal, der mit seinem inneren, gegen die Schnekkenachse gekehrten Rande an die knöcherne Scheidewand der Schnekkenachse angeheftet ist, mit einem Teile der gegenüberliegenden äußeren Fläche dagegen an die innere Fläche des knöchernen Ganges.

Frage 1163. Welches ist nun der Inhalt dieses verwickelten Knochengehäuses des inneren Ohres oder Labyrinthes?

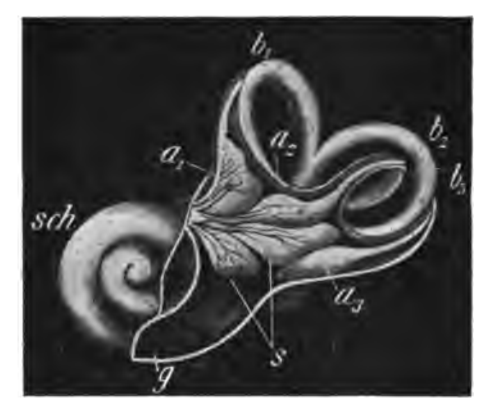
Antwort. In diesem Knochengehäuse befinden sich eine Reihe eigentümlicher Gebilde, welche sämtlich von dem bereits erwähnten äußeren Labyrinthwasser umgeben sind und durch die nebenstehenden Abbildungen erläutert werden. Zunächst ist es das aus einer zarten Membran gebildete, sogen. häutige Labyrinth, welches als eine gleichsam ärmel- oder sackartige Auskleidung an den festen Wänden verläuft, ihnen aber nicht anliegt, sondern nur stellenweise an dieselben mittelst eintretender Nervengefäße und zarter Bindegewebsfäden auf geringe Entfernung angeheftet erscheint, so zwar, dass das Labyrinthwasser zwischen dieser Auskleidung und den Knochenwänden, aus welchen die feinen Nervenfasern heraustreten, zirkulieren kann. Das sonach im Wasser des knöchernen Labyrinths gleichsam schwimmende häutige Labyrinth ist ebenfalls mit einer sehr durchsichtigen wässerigen Feuchtigkeit, dem inneren Labyrinthwasser, gefüllt.

Fig. 640.



Jede von den in den halbzirkelförmigen Kanälen enthaltenen häutigen Röhren, siehe Fig. 640. schwillt an dem dickeren Ende d

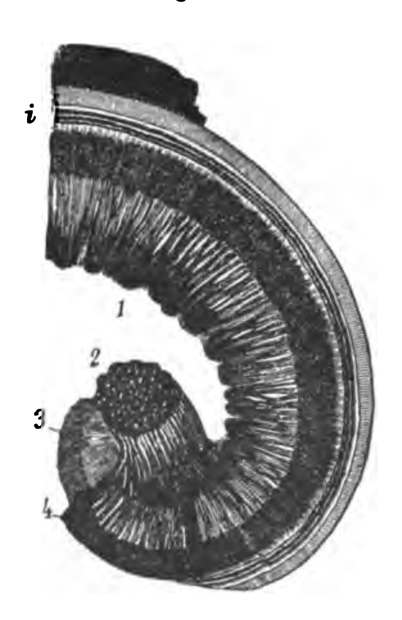
Fig. 641.



Kanäle zu einem eirunden Bläschen, Ampulle (a_1 a_2 a_3) gen., auf, und alle kommen in einem gemeinschaftlichen Schlauche, dem ovalen Vorhofssäckchen, zusammen, welches mit seinem dickeren Ende in der halbeiförmigen Vertiefung liegt und mit dem schlankeren Ende durch den Grund des Vorhofes geht. Ein zweites rundes Vorhofssäckchen, mit dem die häutige Schnecke in Verbindung steht (siehe *S, S,*) liegt in der halbkugelförmigen Vertiefung des Vorhofes. Die beiden Vorhofssäckchen selbst werden nur durch die enge Vorhofswasserleitung mit einander in Verbindung gesetzt.

Frage 1164. Durch den Hinzutritt welches Organes wird aber das oben beschriebene Labyrinth erst zu einem empfindlichen Gehörorgane?

Fig. 642.



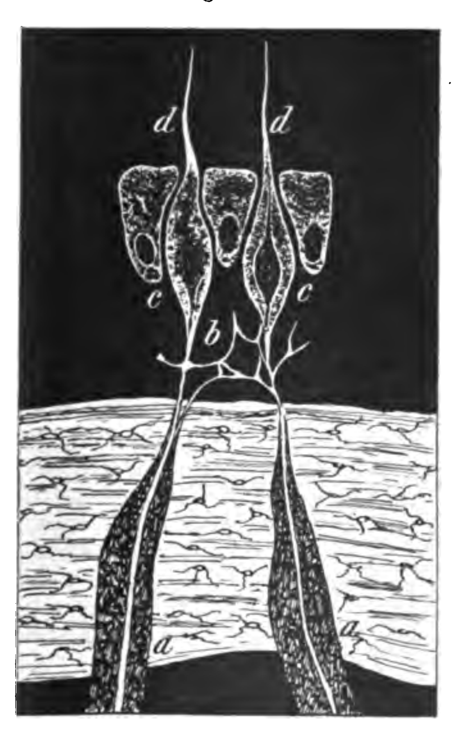
Antwort. Durch den Hinzutritt des Hörnervs. Dieser entspringt weit hinten im Gehirn und teilt sich in einem im Felsenbeine gelegenen Tunnel in zwei Hauptäste: den Vorhofsnerven und den Schneckennerven. Der Vorhofsnerv tritt durch zahlreiche feine Oeffnungen im Knochen an die häutigen Säckchen und verästelt sich in ihrer Wand und in jener der drei Ampullen. An jenen Stellen, wo die Nerven an den Vorhofssäckchen endigen, bemerkt man ein kreideweißes, rundliches Scheibchen, das aus unzähligen mikroskopischen Krystallen besteht, aus kohlensaurem Kalk, mittelst eines organischen Bindemittels vereinigt. Es sind das die Gehörsteinchen oder Otolithen. Der Schneckennerv (2) tritt durch feine kleine Löcher in die Schneckenspindel ein und sendet seine Fasern in radialer Richtung von da durch die knöcherne Scheidewand (Siehe 1, 3, 4, in der nebenstehenden Figur, welche die Ausbreitung des Schneckennerven darstellt) bis zu

deren Rande vor. Hier treten die Nerven zunächst unter den Anfang der Grundmembran, durchbohren diese dann in einer Reihe von Oeffnungen, so dass sie in die häutige Scheidewand gelangen, in welcher sie im Cortischen Organe endigen.

Frage 1165. Wie sind die akustischen Endorgane des Gehörnerven in den Vorhofssäckchen und den Ampullen der drei Bogengänge beschaffen?

Erkl. 1082. In der vorstehenden Figur sind *a* die Gehörnervenfasern, welche bei *b* ein feines Fibrillennetz bilden, von dem Fasern in die Hörzellen *c c* eintreten; *d d* sind Hörstäbchen.

Fig. 643.

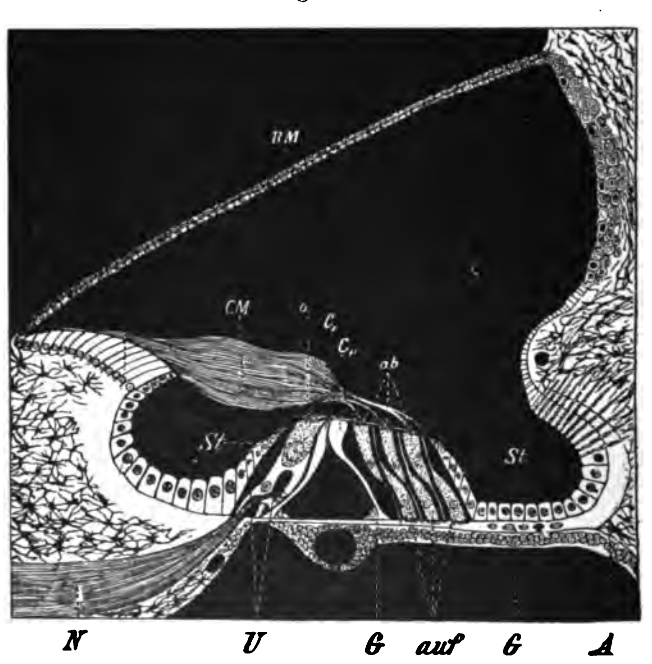


Antwort. Zwischen zylindrischen Stützzellen stehen wieder spindelförmige Zellen mit großem Kerne und Kernkörperchen mit zwei Fortsätzen, von denen der in die Tiefe steigende als eine feinste Nervenfaser des Gehörnerven anzusehen ist, während der obere, über die innere Oberfläche der Haut hervorragende Fortsatz an seiner mit der Spindelzelle zusammenhängenden Basis ziemlich viel dicker ist; oben geht er aber in ein sehr feines, hochelastisches, starres und wie ein Glasfaden brüchiges Stäbchen, das **Hörstäbchen** aus. Diese zahlreichen Hörstäbchen von verschiedener Dicke und Länge, welche eine elastisch häutige Deckschicht durchbohren, sind wohl befähigt, durch die im Labyrinthwasser durch äußere Schallwirkungen erzeugten Wellen in Mitschwingungen versetzt zu werden und dadurch ihre Nervenfasern zu erregen. Man war früher der Meinung, das Cortische Organ in der Schnecke sei das eigentliche musikalische Organ, während man den Hörstäbchen in den Säcken und Ampullen nur die Fähigkeit zur Aufnahme von Geräuschen zusprechen wollte. Da aber die musikalischen Singvögel keine eigentliche Schnecke besitzen, so kann diese Ansicht nicht mehr festgehalten werden.

Frage 1166. Wie ist das längs der Scheidewand der Schnecke ausgebreitete, den Schneckenwindungen folgende, bereits erwähnte Cortische Organ konstruiert, in welches die feinsten Enden des Schneckennerven auslaufen?

Antwort. Das Cortische Organ der häutigen Schnecke (siehe Fig. 639 und Fig. 644) ist zwischen zwei elastischen, häutigen Lamellen, nämlich der Grundmembran *GG* und der Cortischen Membran *CM* ausgespannt, und zeigt eine Anzahl von Zylinderzellen, in deren Mitte sich die berühmten Cortischen elastischen Bögen C_1 und C_2 befinden, die für das akustische Instrument unseres Gehörsinnes den Resonanzhohlraum bilden, der sich als feiner innerer Kanal durch die Schnecke erstreckt. Man sieht in Fig. 644 links den Hörnerven *N* eindringen und unmittelbar nach seinem Eintritte teils in Nervenfasern sich ausbreiten, teils mit den Cortischen Bögen in Verbindung treten, welche aus zwei Reihen von Stäbchen oder Fasern bestehen, von denen je zwei nach Art eines

Fig. 644.



Erkl. 1083. Fig. 644 zeigt den schematischen Durchschnitt des Schneckenganges in stark vergrößertem Maßstabe, und zwar bezeichnet *N* die Nervenfasern des Schneckennerven, *RM* die Reißnersche Membran, *C M* die Cortische Membran, *St* sind innere und äußere Stützen, bei *o* sind innere, obere Hörzellen; sie stehen mit feinen Fasern des Gehörnerven in Verbindung, ihr oberes flaches, rundliches Ende durchbohrt die obere elastische Haut des Cortischen Organs und trägt ein Bündel feiner Hörstäbchen. C_1 sind die aufsteigenden Cortischen Fasern, C_2 desgl. die absteigenden; *a b* sind äußere absteigende Hörzellen, *U* die unteren Enden der inne-

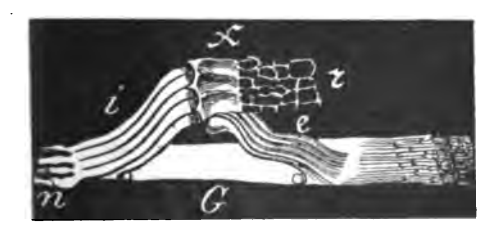
ren Hörzellen, G ist die äußere Grundmembran, $a\,u\,f$ sind aufsteigende Hörzellen, und A der Ansatz der Grundmembran an der Schneckengehäusewand.

Fig. 645.



Erkl. 1084. Die Cortischen Fasern sind umsponnen und umgeben von einer Menge sehr zarter und vergänglicher Gebilde, Fasern und Zellen verschiedener Art, von denen viele nur die Aufgabe haben, zur Stütze für die feinen Vermittler der Schallschwingungen zu dienen. Dies gilt namentlich von den Fäserchen r der zweiten Cortischen Reihe (Fig. 646), welche, in ein netzartiges Flechtwerk übergehend, wie ein Dach auf den Fasern zweiter Reihe

Fig. 646.



ruhen und sie von der darüber befindlichen festen Haut trennen. Die wichtigsten Zellen scheinen die mit Härchen

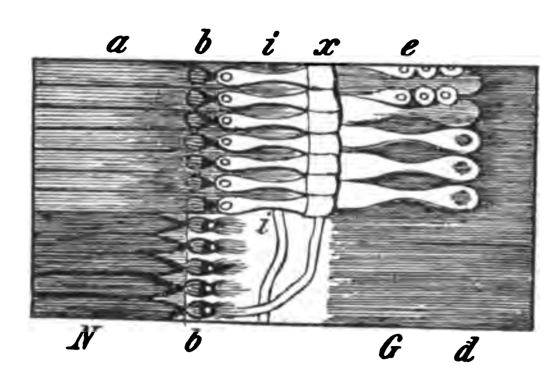
Dachfirstes gegeneinander gestemmt sind. (Siehe Fig. 645 und 646.) Das eine derselben, der sog. Steg ist massiger als das andere, die sog. Saite. Ein einzelnes Paar derselben ist in Fig. 645, eine kleine Reihe in Fig. 646 dargestellt, letztere an der Grundmembran G festhaftend, und bei x noch in Verbindung mit dem gefensterten Gerüste r, in welches sich die Endzellen der Nerven einfügen.

Die Fasern erster Reihe, welche den aufsteigenden Teil C_1 resp. i des Bogens bilden, sind platte, schwach S-förmig gekrümmte Gebilde, die mit einer unteren Endanschwellung von der Grundmembran aufsteigen, an welche sie angeheftet sind, und oben mit einer Art Gelenkstück endigen, welches zur Verbindung mit den Fasern zweiter Reihe bestimmt ist. Diese aufsteigenden Fasern sind auf der ganzen Länge der Schneckenmembran regelmäßig und dicht nebeneinander gestellt, so dass man ihre Zahl auf viele Tausend schätzen muß. Ihre Seiten legen sich dicht an die der Nachbarn an, und scheinen sich selbst mit diesen zu verbinden, aber so, dass stellenweise offene Spalten in der Verbindungslinie stehen bleiben, durch welche wahrscheinlich Nervenfasern treten. So bilden die Fasern erster Reihe zusammengenommen eine Art schiefer Leiste.

Die Fasern zweiter Reihe, welche den absteigenden Teil C_2 resp. e des Bogens bilden, sind glatte, biegsame, zylindrische Fäden mit verdickten Enden. Das obere Ende bildet eine Art Gelenkstück zur Verbindung mit den Fasern erster Reihe, das untere Ende ist glockenförmig erweitert und haftet der Grundmembrane G fest an. Während die Fasern erster Reihe vom inneren Rande der Membran aufsteigen, welcher ver

versehenen zu sein, welche ganz die Bildung der Härchenzellen in den Ampullen (Fig. 643) und im häutigen Labyrinthe haben. Sie sind der beständigste Teil unter den Gebilden der Schnecke, denn bei den Vögeln und Reptilien, wo die Schnecke viel einfacher beschaffen ist und selbst die Cortischen Bögen fehlen, sind es gerade diese Hörzellen, die man überall wiederfindet und deren Härchen so gestellt sind, daß sie an die Cortische Membran *CM* (Fig. 644) bei den Schwingungen der Grundmembran anstoßen können.

Fig. 647.



hältnismäßig wenig erschüttert werden kann, heften sich die Fasern zweiter Reihe ziemlich in der Mitte der Membran an, also gerade da, wo deren Schwingungen am intensivsten sein müssen. Wird der Druck des Labyrinthwassers in der Paukentreppe durch den in das ovale Fenster eindrängenden Steigbügel vermehrt, so muß die Grundmembran nach unten weichen, und die Fasern zweiter Reihe müssen stärker gespannt werden.

Betrachten wir das Cortische Organ mittelst des Mikroskops von oben, nachdem wir die dasselbe verhüllende harte feste Haut hinweggenommen haben, so sehen wir zunächst, dass dasselbe zum Schutze gegen das Labyrinthwasser mit einer zarten Schleimhaut überkleidet ist. Schneiden wir diese vorsichtig weg, so sehen wir unter derselben noch eine weitere zum Schutze des Nerven dienende feste Haut und eine weitere Schicht Schleimhautzellen; dann tritt unterhalb dieser der Nerv von innen ein, seine Fasern *N* (siehe 647) finden kleine harte Oesen *b b*, durch welche sie, regelmäßig in Reihen gestellt, in Verbindung treten mit den inneren Gliedern oder Fasern erster Reihe *i i*, welche sich an ihrem oberen Ende mittelst eines kleinen Gelenkes *x* verbinden mit den äußeren Gliedern oder den Fasern zweiter Reihe *d* und *e*, von denen namentlich die ersteren *d* unmittelbar dem glatten Teile der Grundmembran *G* aufliegen. Letztere wird durch die Erzitterungen des Labyrinthwassers in Schwingungen versetzt, welche sich den Cortischen Fasern zweiter Reihe mitteilen, von wo sie denen erster Reihe und damit den Endigungen des Gehörnerven übertragen werden, und so als Schall zu unserm Bewußtsein kommen.

b) Der Vorgang des Hörens.

Frage 1167. Auf welche Art und durch welche Funktionen der Bestandteile unseres Ohres gelangt ein Schall zu unserer Empfindung?

Antwort. Die durch die Oszillationen des schallenden Körpers erzeugten longitudinalen Verdichtungswellen der Luft dringen durch den äußeren Gehörgang bis an das Trommelfell, wo sie in Querschwingungen oder Transversalwellen umgesetzt und als solche von den mit dem Trommelfell in Verbindung stehenden und hebelartig aufeinander wirkenden Gehörknöchelchen in der Reihenfolge weiter geführt werden, dass die zunächst auf den Hammer übergehenden Wellenstöße von diesem auf den Amboß, dann auf den Steigbügel, und von dessen Fußplatte durch die Membran des ovalen Fensters auf das dahinter befindliche Labyrinthwasser geleitet werden, mit welchem das innere Ohr vollständig erfüllt ist.

Zugleich wird auch die in der Trommelhöhle befindliche Luft durch die Schwingungen des Trommelfelles erschüttert, wodurch auch die das runde Fenster bedeckende Membran und das hinter derselben in der Trommeltreppe der Schnecke befindliche Wasser in Vibrationen versetzt wird. (S. Erkl. 1085.)

Als vorzüglicher Schallleiter, welcher der Zusammendrückbarkeit nicht unterliegt, überträgt das auf diese doppelte Weise (durch das ovale und durch das runde Fenster) in Erregung versetzte Labyrinthwasser die Verschiebungen seiner Molekeln auf die in ihm befindliche Substanz des im Labyrinth weit verzweigten Gehörnerven, welcher dieselben als Schallempfindungen dem Gehirne mitteilt.

Erkl. 1085. Im normalen Ohre werden die Schallwellen durch das Trommelfell und die Kette der Gehörknöchelchen (also durch f e s t e Körper, welche den Schall vorzüglich fortleiten), direkt auf die Membran des o v a l e n Fensters übertragen, während die Uebertragung auf das viel kleinere r u n d e Fenster durch die L u f t der Paukenhöhle nur eine überaus geringe sein kann, besonders auch deshalb, weil das ovale Fenster direkt in den großen Wasserbehälter des Vorhofs mündet, während das runde Fenster nur die geringe Wassermenge in den Windungen der Paukentreppe vor sich hat. Eine wirksame Schallübertragung auf den Gehörnerv erfolgt also vornehmlich durch die Membran des ovalen Fensters. Dagegen wird die Membran des runden Fensters bei heftigen Schallstößen (z. B. Kanonenschüssen), welche die Steigbügelplatte tiefer in das ovale Fenster treiben, schnell nach der Paukenhöhle hinausgepreßt, so dass das Labyrinthwasser wenigstens nach dieser Richtung hin momentan ausweichen kann, und hierdurch die Organe des inneren Ohres vor beschädigenden Erschütterungen bewahrt bleiben. Eine Verletzung des runden Fensters hat nicht nur den Ausfluß des Labyrinthwassers und damit vollständige Taubheit zur Folge, sondern kann auch tötlich wirken.

Frage 1168. Bewirken die unser Ohr treffenden Wellenstöße n a c h e i n a n d e r erfolgende pen-

Antwort. Wenn wir bedenken, wie schnell die Schallschwingun-

delartige Bewegungen der inneren Teile desselben oder durchläuft der Schall die gesamten Glieder unseres Gehörapparates, ohne dass dieselben eine örtliche Bewegung ausführen?

Erkl. 1086. Jeder Druck der Grundfläche des Steigbügels auf die Membran des ovalen Fensters wirkt allemal auf die ganze im Labyrinthe befindliche Wassermasse und erschüttert durch diese alle damit umgebenen Nervenverzweigungen, indem überhaupt ein jeder Druck auf einen Teil einer Flüssigkeit sich durch die ganze flüssige Masse so verbreitet, dass alle Teile derselben mit gleicher Kraft gedrückt werden. Dass starke Schalle eine örtliche Verschiebung der beweglichen Teile unseres Ohres bewirken können, haben dadurch entstandene Störungen, sowie anatomische Versuche bewiesen. Eine solche Wirkung erfolgt auch dann, wenn Gehörknöchelchen fehlen, und die Schallwellen unmittelbar die Membran des ovalen Fensters treffen.

gen, besonders bei hohen Tönen und deren Obertönen aufeinander folgen, wie sehr verschiedenartig dieselben sind, um die Klangfarbe eines Tones oder eines ganzen Orchesters zu erzeugen, so müssen wir zu der Erkenntnis kommen, dass die Zeitdauer einer jeden einzelnen von diesen Bewegungen eine so überaus kurze ist, dass während derselben gegenseitige Verschiebungen der einzelnen Teile unseres Gehörapparates nicht möglich sind, dass vielmehr die Schallimpulse sich nur durch molekulare Schwingungen fortpflanzen durch die zusammenhängende schallleitende Kette der aufeinanderfolgenden Stoffe vom Trommelfell bis zu den Nervenenden.

Frage 1169. Aus welchem Satze der Dynamik erklärt es sich, dass wir (z. B. beim Anhören eines Instrumentalkonzerts) eine ganze Reihe von Tönen zugleich wahrzunehmen vermögen, ohne dass sich die verschiedenen Schwingungszahlen gegenseitig stören?

Erkl. 1087. Die vorausgegangene Beschreibung unseres Ohres ergibt, dass wir die Enden des Hörnerven überall mit besonderen teils elastischen, teils festen Hilfsapparaten verbunden finden, welche unter dem Einflusse äußerer Schwingungen in Mitschwingungen versetzt werden können, und dann die Nervenmasse erschüttern und erregen. Massige Körper, welche einmal angeschlagen, lange nachtönen (wie z. B. Stimmgabeln), müssen aufs genaueste mit ihrem Eigentone mit der Höhe des erregenden Tones übereinstimmen. Nimmt man dagegen wenig massige

Antwort. Aus dem Satze von der Koexistenz der Bewegungen und Kräfte: „Die Wirkung einer Summe von Kräften ist gleich der Summe der Wirkungen der einzelnen Kräfte.“

Sowie ein jeder Körper unendlich viele Arten der Bewegung annehmen kann, ohne dass eine die andere hindert, so können auch dem Labyrinthe sehr verschiedene Arten der Erschütterungen z. B. viele zugleich angegebene Töne auf verschiedenen Instrumenten, zugleich mitgeteilt und von dem Gehörnerven zu gleicher Zeit als verschiedene Arten des Schalles empfunden werden, ohne dass eine Bewegung oder Empfindung die andere stört.

Körper, wie z. B. gespannte Membranen oder dünne Saiten (Cortische Fasern), deren Ton schnell verklingt, so ist deren Mittönen nicht so beschränkt auf eine gewisse Tonhöhe, sie werden von ziemlich verschiedenartigen Tönen leicht erregt.

Frage 1170. Wodurch wird es bewirkt, dass das Trommelfell von allen auf dasselbe treffenden Tönen in Schwingungen versetzt wird und immer genau in der Schwingungszahl des betreffenden Tones schwingt?

Antwort. Dieses wird dadurch bewirkt, dass den Schwingungen des Trommelfelles durch seine Verbindung mit den Gehörknöchelchen und der Membran des ovalen Fensters ein Widerstand entgegengesetzt wird, der ihnen ihren tonbestimmenden Einfluß raubt, dann aber auch dadurch, dass mit Hilfe des kleinen am Hammer angewachsenen Spannmuskels das Trommelfell in höherem oder geringerem Grade gespannt und dadurch willkürlich der Eigenton desselben erhöht und dem Tone genähert werden kann, welcher von außen an das Trommelfell anschlägt. Je zweckmäßiger das Trommelfell durch jenen kleinen Muskel gespannt wird, um so genauer wird sein Eigenton sich dem gehörten Tone anpassen, um so besser wird das Trommelfell die Schallwellen auffangen können.

Erkl. 1088. Durch Schallwellen der Luft kann das Trommelfell als gespannte elastische Membran leicht in Schwingungen versetzt werden. Jede gespannte Haut wird am leichtesten zum Mittönen gebracht, wenn die Schallwellen desjenigen Tones auf sie wirken, den sie selber vermöge ihrer Spannung hervorbringen kann. Man kann aber den Eigenton einer gespannten Haut durch stärkere Anspannung erhöhen, durch geringere erniedrigen, wie es bekanntlich beim Stimmen der Trommeln und Pauken geschieht.

Frage 1171. Welche Vorteile gewährt die schiefe Stellung des Trommelfelles gegen die Achse des Gehörganges?

Antwort. Durch die gegen die Achse des Gehörganges schiefe Stellung des Trommelfelles (welches beim erwachsenen Menschen eine Oberfläche von etwa 50 qmm besitzt, und bei Tieren mit kleinerem Schädel nicht viel kleiner ist) wird eine größere Fläche und grö-

Erkl. 1089. Das äußere Ohr reflektiert die Schallstrahlen, von welchen es getroffen wird, nach dem äußeren Gehörgange. Allein seinem Baue ent-

sprechend müssen die meisten auf das Ohr fallenden Schallstrahlen wieder nach außen reflektiert werden, und nur diejenigen, welche in die Vertiefung der eigentlichen Ohrmuschel gelangen, werden gegen die vordere Ohrecke und von da in den Gehörgang geworfen. Letzterer ist übrigens so gewunden, daß nahezu alle Schallwellen zunächst auf die Wände des Ganges und von da erst auf das Trommelfell selbst geworfen werden.

ßere Schwingungsfähigkeit desselben erzielt, als wenn dasselbe in einem gleichweiten Kanale senkrecht ausgespannt wäre. Zu gleicher Zeit aber wird dadurch auch bewirkt, dass eine größere Anzahl der von den Wänden des Gehörganges zurückgeworfenen Strahlen mehr senkrecht auf das Trommelfell trifft, als es geschehen würde, wenn letzteres eine perpendikuläre Stellung hätte.

Frage 1172. Welche Vorteile gewährt es, dass die Schallschwingungen des Trommelfelles auf eine Kette aus unter sich durch Gelenke verbundenen Knochen anstatt auf einen einzigen derselben übertragen werden?

Antwort. Auch ein einziger Knochen würde die Schallwellen weiter leiten können, aber er würde es nicht gestatten, dass das Trommelfell abwechselnd gespannt, d. h. nach innen gezogen würde, ohne dass das Ende dieses am Trommelfell befindlichen und mit demselben bewegten Knochens durch das ovale Fenster heftiger auf das Labyrinthwasser drückte. Indem dagegen der Hammer sich auf dem Ambosse etwas dreht, wenn der Trommelfellspanner seinen am Trommelfell angewachsenen Stiel nach innen zieht und dadurch das Trommelfell spannt, wird es vermieden, dass der Steigbügel zu stark in das ovale Fenster gepresst wird; und sollte ja die Bewegung des Hammers eine zu schnelle und plötzliche sein, so dient noch das kleine Gelenkchen zwischen Steigbügel und Amboß zum Ausgleich.

Erkl. 1090. Die Kette der Gehörknöchelchen hat für uns noch den Nutzen, die Wahrnehmung des Schalles zu vereinfachen. Wenn die vom Trommelfell aufgenommenen und dem Hammer mitgeteilten Schallschwingungen auf den Amboß übertragen werden, so muß ein Teil der Schwingungen verloren gehen, gleichwie auch beim Uebergange vom Amboß auf den Steigbügel durch die Gelenkverbindung der Gehörknöchelchen, so dass eine erhebliche Menge der Schallwellen, welche von der Außenwelt in unser Ohr gelangen, beim Durchgange durch die drei Gehörknöchelchen unwirksam gemacht wird. Demnach würden die Gehörknöchelchen den weiteren Nutzen haben, nur diejenigen Schallwellen weiter zu führen, welche in der Längsrichtung eines festen Körpers sich weiter leiten lassen, so dass wir statt der vielfachen verworrenen Töne und Geräusche, die uns be-

ständig umgeben, nur einzelne Reihen von Schallwellen deutlich wahrnehmen können.

Frage 1173. Aus welcher Betrachtung geht hervor, dass unsere Gehörswahrnehmungen sehr verworrene sein würden, wenn d i e d r e i B o g e n g ä n g e in unserem Gehörapparate nicht vorhanden wären?

Erkl. 1091. Das Wasser leitet den Schall durch sog. Erzitterungswellen fort, wobei jedes einzelne Wasserteilchen seine zitternde Bewegung auf die benachbarten Teilchen überträgt. Ist die Masse des Labyrinthwassers in Erzitterung versetzt, so pflanzt sich die Zitterwelle so lange fort, bis sie an das Hindernis eines harten Körpers stößt; hierbei geht ein Teil der Wellenbewegung verloren, indem er sich an jenen Körper überträgt, ein anderer Teil prallt aber zurück. Trifft die Welle, in das Innere der Schneckengänge eindringend, auf die daselbst ausgebreiteten Enden des Gehörsnerven, so nehmen wir einen Schall wahr. Diese Erzitterungswelle wird aber auch nach der andern Seite zurückgeworfen, und von dieser abermals zurückkehrend als neue Welle empfunden werden; wir würden jeden einzelnen Schall somit mehrmals wahrnehmen und also sehr verworrene Schalleindrücke empfangen, wenn kein Hemmungsapparat im Ohre angebracht wäre, durch welchen das erregte Labyrinthwasser beruhigt wird.

Antwort. Die Zitterwellen des Labyrinthwassers (siehe nebenstehende Erkl.) werden von der festen Umgebung des Schneckeneinganges nach der entgegengesetzten Seite zurückgeworfen und gelangen so nach den drei Bogengängen. Diese münden mit erweiterten Oeffnungen in den Hohlraum des Labyrinthes, und zwar jeder Bogengang mit zwei Oeffnungen, mit Anfang und Ende zugleich. Trägt also das Labyrinthwasser eine Schallwelle gegen die Bogengänge hin, so muß die Schallwelle in beide ihr zugekehrten offenen Enden jedes Bogenganges gleichzeitig eindringen, sie wird also in beiden Armen des Bogenganges zugleich fortschreiten bis in die Mitte des Bogens, und da werden sich beide Wellen treffen; beide sind von gleicher Stärke, denn sie haben gleichen Ursprung; beide kommen aber aus entgegengesetzter Richtung aufeinander, und indem sie gegeneinander anstoßen, heben sie sich auf, und das Wasser wird ruhig. In den Bogengängen verschwinden also die Schallwellen; weil gleichzeitig von zwei verschiedenen Seiten die Bewegung des Wassers aufeinander trifft und ineinander übergehend sich gegenseitig vernichtet.

Frage 1174. Da die Fasern der Cortischen Bögen, der Gestalt der Schnecke entsprechend, von unten nach oben kleiner werden und so

Antwort. Helmholtz stellte sich vor, dass durch Mitschwingen der Saiten und Stege, d. h. der ab-

an die an Größe und Dicke abnehmende Reihe von Glas- oder Stahlstäben erinnern, wie sie in der Glasharmonika und dem Metallophon zu sehen sind, so stellte Helmholtz welche Theorie inbezug auf die Tonempfindungen auf?

Erkl. 1092. Ein geübtes Ohr ist imstande, noch Töne zu unterscheiden, deren Schwingungszahlen sich wie 1000 : 1001 verhalten, also bei einer tönenden Saite eines Monochords von 1 m Länge die Verschiebung des Steges um 1 mm wahrzunehmen. Auch unterscheidet das Ohr bis auf $^1/_{100}$ Sekunde, ob die Schläge zweier Pendel zusammenfallen oder nicht.

und aufsteigenden Cortischen Fasern, besonders der ersteren, die Endfasern des akustischen Nerven erregt würden, und er war der Meinung, dass jedes dieser Gebilde auf einen bestimmten musikalischen Ton, etwa wie die Saiten eines Klaviers, abgestimmt ist.

Frage 1175. Warum hat Helmholtz diese Vorstellung später fallen lassen?

Erkl. 1093. Die übrigen wesentlichen Teile der Schnecke, namentlich die Grundmembran, die mit den Nervenenden in Verbindung stehenden haartragenden Zellen und die den Enden dieser Härchen gegenübergestellte Cortische Membran (s. Fig. 644) ist auch im Gehörorgane der Vögel und Amphibien vorhanden.

Antwort. Weil die vergleichenden anatomischen Untersuchungen von C. Hasse zeigten, dass die Cortischen Bögen (Stege und Saiten) auf der Grundmembran in der Schnecke der Vögel gänzlich fehlen, und doch diesen Tieren die Fähigkeit des Hörens, sowie des Unterscheidens der Töne nicht abgesprochen werden kann. Ueberdies scheint das Cortische Organ auch nicht elastisch zu sein, und die Länge seiner Fasern ist für die ihnen zugeschriebenen Leistungen ungenügend.

Frage 1176. Wie lautet die neue Theorie von Helmholtz über die Tonempfindungen?

Erkl. 1094. „Den tausendfältig verschiedenen Tonempfindungen scheint eine wenigstens gleiche Anzahl spezi-

Antwort. Helmholtz überträgt die früher den Cortischen Bögen zugeschriebene Rolle nunmehr der Grundmembran *G* (Fig. 644) oder der Membrana basilaris, welche der Breite nach zwischen beiden Knochenwindungen eingebettet, einen Teil der Scheidewand zwi-

fischer Tonempfindungsapparate im Labyrinth des Ohres, eben jene verschiedenen Nervenstäbchen der Nervenstäbchen-Harmonika, zu entsprechen. Man konnte experimentell nachweisen, dass die, ähnlich wie Glasfäden, elastisch starren, zum Teil ziemlich langen Hörstäbchen, eben unsere mehrfach genannten, frei in das Labyrinthwasser hereinragenden Nervenstäbchen (Fig. 643), außerordentlich geeignet sind, durch Wellenbewegungen der sie umgebenden Flüssigkeit, wenn diese ihrer eigenen, je nach der Länge und Dicke der Stäbchen verschiedenen Schwingungsfähigkeit entsprechen, zu Mitschwingungen veranlaßt zu werden. Diese zitternden Bewegungen der Hörstäbchen übertragen sich als mechanischer Reiz auf die in direkter Verbindung mit ihnen stehenden feinsten Gehörnervenfasern, welche, wie alle Nervenfasern, durch rasch aufeinanderfolgende zitternde Bewegungen erregt werden können. Jede musikalische Schallbewegung versetzt diejenigen der verschieden gestimmten mikroskopischen, tonempfindlichen (akustischen) Nervenapparate, die ihrer eigenen Tonhöhe entsprechen, in gleichstimmige Schwingungen, so dass der mit einem solchen Gehörstäbchen verknüpfte Teil der nervösen Gehörssinnsubstanz immer nur durch eine ganz bestimmte spezifische Gehörsempfindung, nur einem Tone entsprechend, erregt wird."

Erkl. 1095. Durch die Helmholtzsche Hypothese werden also die Erscheinungen des Hörens auf solche des Mitschwingens zurückgeführt. Wird dem Ohre ein zusammengesetzter Klang zugeleitet, so wird derselbe von den mitschwingenden Teilen in unserm Ohre in seine einzelnen einfachen Teiltöne getrennt, genau so, wie wir seine komplizierten Schwingungen durch Resonatoren in die einzelnen sie kombinierenden pendelartigen Schwingungen von verschiedener Tonhöhe, den harmo-

schen Vorhof und Paukentreppe bildet. Die Breite dieser Membran ist am Anfang der Schnecke eine geringe, sie wächst, je mehr sie sich der Kuppel der Schnecke nähert, bis mehr als zum 12-fachen. Die Grundmembran selbst besteht aus radialen, sie der Breite nach durchsetzenden ziemlich festen Fasern, welche parallel, in der angegebenen Weise an Länge wachsend, nebeneinander gelagert sind, und welche in der Längsrichtung der Membran viel weniger fest miteinander verbunden sind. Durch diese eigentümliche Struktur, infolge deren die Membran in der Richtung ihrer Breite sehr viel stärker gespannt ist als in der Richtung der Länge, verhält sich die Grundmembran annähernd so, als wären ihre Radialfasern ein System von gespannten Saiten, deren membranöse Verbindung nur dazu dient, die schwingende Flüssigkeit der Schnecke an dem freien Durchtritt zwischen den Saiten zu hindern, und so zu bewirken, dass die Schwingungen des Labyrinthwassers sich auf die Membran übertragen. Es werden deshalb die Bewegungen der einzelnen Fasern der Membran dieselben sein, als wäre jede einzelne unabhängig von der andern und folgte jede für sich den Schwingungen des Wassers in der Schnecke.

Für diese radialen Fasern der Membrana basilaris mit ihren Anhängen, den Cortischen Fasern, nimmt nun Helmholtz an, dass jede für eine bestimmte Schwingungszahl abgestimmt ist. Danach wird ein in das Ohr eindringender Ton namentlich diejenige Stelle der Grundmembran in Mitschwingungen versetzen, an denen der Eigenton der gespannten und mit den verschiedenen Anhangsgebilden belasteten Radialfasern der Membran dem erregenden Tone am

nischen Obertönen entsprechend, zerlegen können. Dasselbe erfolgt bei einem Akkorde. Die Empfindung der Klangfarbe beruht darauf, dass ein Klang außer den seinem Grundtone entsprechenden Endapparaten noch eine Anzahl anderer in Bewegung setzt und so in verschiedenen Gruppen von Nervenfasern Empfindungen erregt. Die Empfindungen der Geräusche werden durch plötzliche, meist schnell gedämpfte Bewegungen der akustischen Endapparate hervorgerufen. Die Stärke der Schallempfindung ist innerhalb gewisser Grenzen direkt proportional der Bewegungsstärke der im inneren Ohre mitschwingenden Apparate. Helmholtz hat gezeigt, dass im inneren Ohre ein sehr vollkommener Dämpfungsapparat existieren muß. Als solchen sieht man die Cortische Membran *CM* an, die durch ihre vollkommen freie Lage und ihre schleimige Beschaffenheit besonders befähigt erscheint, gewissermaßen wie ein Gallertschleier den mit Haarzellen versehenen Teil des akustischen Endapparates zur Ruhe zu bringen.

besten entspricht, von da werden sich die Schwingungen in schnell abnehmender Stärke auf die benachbarten Teile ausbreiten. Dass die Fasern, trotz ihrer geringen Länge, auf die tieferen Töne der Tonskala abgestimmt sein können, das liegt nach der Annahme von Helmholtz eben in den Anhangsgebilden, welche die Fasern belasten.

Durch die Schwingungen der Radialfasern der Membran werden also direkt die mit denselben verbundenen Cortischen Fasern in dieselben Schwingungen versetzt, und damit die in diesen Fasern befindlichen Nerventeile, welche die Empfindung des Tones vermitteln. Es würde demnach für jeden Ton eine bestimmte oder doch eine beschränkte Zahl von Nervenfasern erregt, so dass die verschiedenen Töne von ganz verschiedenen Fasern empfunden werden.

Frage 1177. Inwiefern erklärt sich aus dieser Theorie des Hörens die große Empfindlichkeit, welche ein geübtes Ohr für geringe Unterschiede in der Tonhöhe hat?

Erkl. 1096. Dr. H. Zwaardemacher und Dr. Cuperus haben bei 300 Personen verschiedenen Lebensalters mit völlig normalem Gehörorgane den Umfang des Gehörs festgestellt. Zur Bestimmung der oberen Tongrenze diente das Galtonpfeifchen, (eine gedeckte Orgelpfeife, deren Länge durch eine Mikrometerschraube verkürzt werden kann, siehe II. Bd. der Akustik, Seite 429); die Bestimmung der unteren Tongrenze geschah mittelst der Appunn-

Antwort. Nach Waldeyer sind etwa 4500 äußere Bogenfasern in der menschlichen Schnecke enthalten. Rechnen wir 300 auf die in der Musik nicht gebrauchten Töne, so bleiben 4200 für die sieben Oktaven der musikalischen Instrumente, d. h. 600 für jede Oktave, 50 für jeden halben Ton, jedenfalls genug, um die Unterscheidung kleiner Teile eines halben Tones zu erklären. Aber nach der Angabe von E. H. Weber vermag ein geübtes Ohr etwa 700 Tonstufen innerhalb einer Oktave zu unterscheiden, also noch mehr, als der für jede Oktave vorhandenen An-

schen Lamelle (420 mm lang, 12 mm breit, 1 mm dick). Danach umfaßt unser Gehör in der Jugend 11, im Greisenalter 10 Oktaven, und zwar beträgt der Verlust an der oberen Grenze ⅔, an der unteren ⅓ einer Oktave. Im Alter von 7 Jahren liegt die obere Tongrenze bei e^7, sie sinkt bis zum Eintritt der Pubertät um ¼-Ton, bleibt dann auf derselben Höhe bis zur Beendigung des Knochenwachstums und fällt dann dauernd. Im 32. Jahre ist sie dis^7 im 40. d^7, im 43. cis^7, im 51. c^7, im 54. h^6, im 75. a^6. Abweichungen, und zwar nach unten, fanden sich nur bei etwa 1 Prozent der Personen. Die untere Grenze liegt im 13. Jahre bei E_3, im 21. bei E_3, im 65. bis 70. bei Gis_3. Der Verlust an der oberen Grenze beruht auf einer Veränderung der Knochenleitung, der an der unteren in Aenderungen im Trommelfell oder in der Kette der Gehörknöchelchen. In der Jugend liegt die Mitte der Gehörlinie bei ais^1, im Anfange des Greisenalters bei a^1.

zahl von Cortischen Fasern entspricht. Das liegt nach Helmholtz daran, dass, wenn ein Ton angegeben wird, dessen Höhe zwischen dem zweier benachbarten Cortischen Fasern liegt, dass dann beide in Schwingungen versetzt werden, diejenige aber stärker, deren Eigenton dem angegebenen Tone näher liegt.

Die Empfindlichkeit des Ohres für verschiedene Tonhöhen wird also nur von der Feinheit abhängen, mit welcher der Unterschied der Erregungsstärke der beiden benachbarten Fasern wahrgenommen werden kann. Dieses Einwirken eines Tones auf mehrere Fasern erklärt es auch, dass bei beständig steigender Tonhöhe unsere Empfindung sich beständig ändert und nicht stufenweise springt, wie es der Fall sein müßte, wenn durch jeden Ton nur eine einzelne Cortische Faser in Schwingungen versetzt würde.

Frage 1178. Woraus geht hervor, daß das Geheimnis der Tonempfindungen noch nicht vollständig gelöst ist?

Antwort. Es sind in neuerer Zeit Fälle beobachtet worden, wo Teile der Schnecke durch Knochenbrand abgestoßen wurden, ohne dass die Perzeptionsfähigkeit (d. h. das Wahrnehmungsvermögen) für Tonhöhen erheblich gelitten hätte, oder hinsichtlich der Tongrenzen eingeengt worden wäre. Gleiche Erfahrungen wurden an den Bogengängen bei Substanzverlust oder Mißbildung gemacht.

Erkl. 1097. Unser Gehör nimmt alles wahr, was in seiner Hörweite an schallbildenden Bewegungen vorgeht; zur Beobachtung des von dem Sinne Wahrgenommenen gelangen wir aber erst dann, wenn infolge eingetretenen Bedürfnisses oder durch Zufall unsere Aufmerksamkeit auf einzelnes besonders gelenkt wird. So haben wir z. B. von dem sog. Tagesgeräusche im allgemeinen kein Bewußtsein. Wir bemerken dasselbe aber sofort, wenn wir eine Muschel oder die Mündung einer Flasche dem Ohre nähern.

Frage 1179. Aus welchem Versuche geht hervor, dass nicht bloß die Schallstrahlen der Luft Gehörsempfindungen verursachen, sondern auch die Kopfknochen leicht in Schwingungen geraten und den Schall bis zum Felsenbeine und dem im Labyrinthe desselben ausgebreiteten Gehörnerven leiten?

Antwort. 1) Halten wir eine gehende Uhr in einiger Entfernung von unserem Gesichte, so hören wir ihr Ticken nur leise; nähern wir sie so weit, dass sie die vorgestreckten Lippen berührt, so wird die Gehörsempfindung nur wenig deutlicher; bringen wir sie aber in den Mund, so daß die oberen oder unteren Zähne sie berühren, so hören wir in demselben Augenblicke den Gang der Uhr nach allen Einzelheiten auf das deutlichste.

2) Wir hören eine tönende Stimmgabel, wenn wir uns dieselbe auf den Kopf setzen, stärker als aus der Luft, und zwar merkwürdiger Weise bei verstopften Ohren ungleich stärker als bei offenen.

Erkl. 1098. Wie jeder feste Körper, so leiten auch unsere Kopfknochen die Schallwellen noch besser und unmittelbarer weiter, als die Luft dies tut. Die Schallwellen der Luft teilen sich zwar nur schwer den Kopfknochen mit, und wir sind deshalb bei verstopften Gehörgängen für Lufttöne beinahe taub. Dagegen übertragen sich die Schallwellen aus dem Wasser leicht auf die Kopfknochen, denn unter Wasser getaucht, hören wir auch bei verstopften Ohren im Wasser erregte Geräusche sehr deutlich. Die Erzitterungen der Grundmembran und der auf ihr liegenden Cortischen Fasern werden in solchen Fällen durch die Schwingungen der festen Knochensubstanz, an der die Grundhaut festgeheftet ist, verursacht.

Frage 1180. Aus welchen Erscheinungen geht hervor, dass nicht jeder Gehörsempfindung ein Schall zugrunde liegt, welcher unseren Gehörnerven zugeleitet wurde (objektive Gehörsempfindungen), sondern dass wir auch beim vollständigen Mangel objektiver Schalle Gehörsempfindungen (subjektive Gehörsempfindungen) haben können?

Antwort. Von diesen entopischen Schallwahrnehmungen, welche auf Schallerzeugungen in unserem Ohre selbst zurückzuführen sind, ist am allgemeinsten das „Knacken im Ohre“ bekannt, welches bei plötzlicher Oeffnung der Ohrtrompete, z. B. beim Kauen oder beim Bergsteigen, wenn man zu dünneren oder dichteren Luftschichten gelangt, zu hören ist. Es rührt von einer

Erkl. 1099. Hierher gehören namentlich die Gehörsempfindungen bei

Blutandrang oder Blutverlusten, vor dem Eintritt einer Ohnmacht, bei narkotischen Vergiftungen und im Beginn gewisser Krankheiten. Bei Verschluß der Ohren und veränderter Stellung des Kopfes zur vermeintlichen Schallquelle verändern sich die subjektiven Empfindungen nicht. Bei psychischen Störungen aber können dieselben leicht als objektive Empfindungen aufgefaßt werden (sog. Gehörshalluzinationen).

plötzlichen Veränderung der Trommelfellspannung her. Auch rein subjektive Gehörsempfindungen, z. B. Ohrenklingen, welche keinem äußeren Schallreize entsprechen, sind bekannt. Sie rühren meist von geringen Abweichungen in der Blutzirkulation im innern Ohre her und beruhen auf einer Erregung eines oder mehrerer benachbarten Gehörnervenorgane im Labyrinthe.

Frage 1181. Wonach beurteilen wir bei objektiven Gehörsempfindungen die Entfernung der Schallquelle?

Antwort. Wir beurteilen die Entfernung nur aus der größeren oder geringeren Stärke des empfundenen Schalles, nach der verschiedenen Klangfarbe und nach der Genauigkeit, mit welcher wir die einzelnen Tonelemente zu unterscheiden und zu beurteilen vermögen. Selbstverständlich sind wir hierbei mancherlei Täuschungen ausgesetzt, doch schützen wir uns oft dagegen durch die bereits gemachten Erfahrungen, durch Veränderung unseres Abstandes von der Schallquelle und dergl.

Erkl. 1100. Wenn wir in einem Zimmer sitzend ein Geräusch mittlerer Stärke vernehmen, so wissen wir oft nicht zu unterscheiden, ob es aus einem Nebenzimmer, oder ob es von der Straße her in unser Ohr drang. Wenn dieses Geräusch aber durch das Sprechen menschlicher Stimmen hervorgebracht wird, so unterscheiden wir in der Regel die größere oder geringere Nähe desselben viel bestimmter, weil wir in der Nähe die einzelnen Worte hören, in der Entfernung dagegen nur den allgemeinen Schall des Gesprochenen.

Frage 1182. Wodurch erkennen wir die Richtung des Schalles?

Antwort. Die Richtung des Schalles erkennen wir durch die Ohrmuschel und das Trommelfell und verlegen dieselbe in diejenige gerade Linie, in welcher wir den Schall am deutlichsten wahrnehmen; dies ist die Linie der rechtwinklig auf das Ohr fal-

Erkl. 1101. Das Trommelfell ist das Hilfsmittel, durch welches wir wahrnehmen, dass ein Schall von außen, und ob derselbe von rechts oder links kommt,

indem dasjenige Trommelfell, welches der Schallrichtung zunächst liegt, am stärksten getroffen wird. Füllen wir den äußern Gehörgang vollständig mit Wasser an, so dass das von Wasser bedeckte Trommelfell nicht ungehindert schwingen kann, so empfinden wir starke Schalleindrücke so, als ob sie im Kopfe selber hervorgebracht worden wären. Auch unsere eigene Stimme hören wir in anderer Weise als die eines vor uns Stehenden, weil die von außen kommenden Schallwellen auf die Knochen übertragen und unmittelbar durch diese fortgepflanzt werden.

lenden Schallstrahlen oder die akustische Achse. Durch Drehung des Körpers oder des Kopfes finden wir die günstigste Stellung des Ohres zu den Schallstrahlen. Der Schall gelangt dann gerade in das dem Orte seiner Entstehung zugewendete Ohr, und wir glauben geradezu den Schall mittelst dieses Ohres allein zu hören, was jedoch eine Täuschung ist. Kommt dagegen ein Schall gleichmäßig in beide Ohren, z. B. von einer gerade vor uns liegenden Schallquelle, so haben wir keine Veranlassung denselben auf das eine Ohr mehr als auf das andere zu beziehen, und wir verlegen dann die Schallquelle in die Verlängerung der Ebene, durch welche wir unsern Körper in eine rechte und linke Hälfte geteilt denken können. Ein Schall, der beide Ohren, wenn auch ungleich stark trifft, wird für gewöhnlich einfach gehört.

Frage 1183. Welche Erscheinungen liefern direkte Beweise für die geradlinige Ausbreitung des Schalles?

Erkl. 1102. Dass das Licht sich in gerader Linie ausbreitet, lehrt uns die alltägliche Erfahrung, z. B. an der Schattengrenze. Das Licht geht nicht um die Ecke, wohl aber der Schall. Trotzdem schließen wir aus den Reflexionserscheinungen des Schalles, dass sich derselbe in geraden Linien ausbreitet. Einen allgemeinen unmittelbaren Beweis durch das Ohr, wie wir ihn beim Lichte durch das Auge haben, gibt es nicht. Im Gegenteil sind wir oft nicht imstande zu beurteilen, aus welcher Richtung ein Schall kommt.

Antwort. Schwache Schallquellen hört man nur dann, wenn das Ohr in bestimmter Richtung gegen sie gehalten wird.

Eine kleine Damenuhr z. B. kann man ganz nahe vor das Gesicht halten, ohne ihr Ticken zu hören, während man es noch in einer Entfernung von mehr als einem Meter hört, wenn man die Uhr in gerader Richtung gegen das Ohr hält.

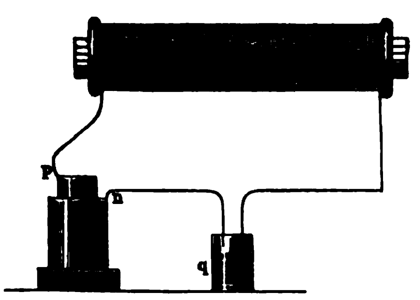
In noch viel auffälligerer Weise und weniger auf der Schwäche der Schallquelle als auf der Höhe ihrer Töne beruhend, zeigt sich die geradlinige Ausbreitung des Schalles bei einem Eisendrahtbündel, welches in einer von einem unterbrochenen galvanischen Strome

(Siehe S. Kalischer. Ueber die geradlinige Ausbreitung des Schalles. Wiedemanns Annalen, Bd. 41).

Wenn das eine Ohr verstopft ist, und man bleibt mit verbundenen Augen immer in derselben Stellung, so scheint der Schall, wo die Schallquelle auch sein mag, immer von der Seite des offenen Ohres herzukommen, und zwar von dem Orte, welcher dem Ohre gerade gegenüberliegt, oder mit anderen Worten, in der akustischen Achse des Ohres. Wird der Kopf nach und nach, bei unveränderter Fortdauer der Schallintensität, gegen alle Punkte des Horizonts gedreht, so hört man den Schall bald stärker, bald schwächer, je nachdem die akustische Achse des offenen Ohres sich der Schallrichtung nähert oder sich von derselben entfernt, und die Empfindung wird am stärksten, wenn die akustische Achse mit der Richtung der Schwingungen zusammentrifft. Man wird also durch ein einziges Ohr auf diese Art die wahre Richtung des Schalles entdecken können. Sind beide Ohren geöffnet, so wird man aus der Ungleichheit der durch jedes Ohr gegebenen Empfindung die wahre Richtung des Schalles erkennen, vorausgesetzt, dass der Schall nicht gerade vor oder hinter dem Hörenden erregt wird.

durchlaufenen Spirale aus Kupferdraht steckt. Ein solches Bündel gibt klirrende Töne, welche auf einige Meter Entfernung gehört werden, wenn wir das Ohr so halten, dass von einem Punkte des aus der Spirale hervorragenden Drahtbündels ein geradliniges Schallstrahlenbündel nach dem Inneren des Ohres gezogen werden kann. Ist dies nicht der Fall, so hört man nichts, selbst wenn man sich mit dem Gesichte ganz dicht über die Spirale beugt.

Fig. 648.



Die geradlinige Ausbreitung des Schalles von dieser Quelle aus läßt sich in folgender Weise deutlich zeigen: Die Spirale mit ihrem Drahtkern (Fig. 648) liegt auf einem Tische von gewöhnlicher Höhe, jedoch, um nicht durch die Resonanz desselben gestört zu werden, nicht unmittelbar darauf, sondern durch Korkstückchen oder Filzscheiben von ihm isoliert. Nun stellt man sich, das Ohr dem Drahtbündel zugewandt, in einer gewissen Entfernung dem einen Ende desselben gegenüber auf, in welcher man das Klirren vollkommen scharf hört. Dreht man nun den Kopf auch nur wenig nach rechts oder links, so verschwindet der Ton vollkommen. D e r U e b e r g a n g v o m d e u t l i c h e n H ö r e n z u m V e r s c h w i n d e n d e s T o n e s e r f o l g t n a h e z u p l ö t z l i c h.
Infolge der oben erwähnten Bedingung, von welcher die Wahr-

nehmung dieser Töne überhaupt abhängt, vernimmt man sie bei aufrechter Körperhaltung, das Ohr immer der Schallquelle zugewandt, in ca. 1½ m Entfernung von derselben am deutlichsten. Nähert man sich nun, ohne die Haltung des Kopfes irgend zu ändern, dem Drahtbündel, so werden die Töne schwächer, und in einer Entfernung von ½ m bis zur größten Nähe hört man nichts. Man hat somit die paradoxe Erscheinung, dass die Intensität des Schalles mit der Annäherung an die Quelle desselben, bei unveränderter Haltung des Ohres, schwächer wird und bis zu Null abnimmt.

Frage 1184. Mit Hilfe der Ohrmuschel erkennen wir, ob der Schall von vorn oder von hinten kommt. Wir hören für gewöhnlich einen gleich starken Schall stärker und schärfer, wenn die Schallwellen von vorn her zu uns gelangen, als wenn sie von hinten kommen. Durch welchen Versuch läßt sich beweisen, dass wir gewöhnt sind, nach der Stärke des Schalles die Richtung von vorn und von hinten zu unterscheiden?

Antwort. Wenn wir einen entfernten Schall deutlicher hören wollen, so vergrößern wir die Ohrmuschel durch die dahinter gehaltene flache Hand. Wir können aber auch die Zuleitung des Schalles in umgekehrter Richtung herstellen, indem wir die flache Hand dicht vor der Ohröffnung mit der Kleinfingerseite an den Kopf legen und mit gebeugtem Daumen die Ohrmuschel unterhalb des Gehörganges möglichst dicht und flach an den Kopf drücken. Stellen wir auf diese Weise an jeder Seite des Kopfes eine solche große Ohrmuschel her, welche die Schallwellen nach hinten wirft, und schließen die Augen, so sind wir den größten Irrtümern bei Beurteilung der Richtung der Schallwellen ausgesetzt; wird der Schall hinter uns erregt, so meinen wir es geschehe vor dem Gesichte, und wird unmittelbar vor uns geklopft, so scheinen die Schallwellen von hinten her zu kommen.

Anmerkung XXXIX. Von großem Einfluß auf die Feinheit unseres Gehöres ist die Uebung desselben. So können Musiker, welche ihr Gehör vorzugsweise zum Auffassen der Töne geübt haben, inmitten eines Chores den Ton einer einzelnen Stimme verfolgen, während Personen, deren Gehör nicht musikalisch geübt ist, nur den allgemeinen Eindruck des Chorgesanges erhalten.

Besonders auffallend ist die Gehörsentwickelung bei Blinden, welche durch das Bedürfnis dazu genötigt werden, feinere Unterschiede aufzuspüren und wahrzunehmen, als der Sehende. Es gibt Blinde, welche, in ein ihnen unbekanntes Zimmer geführt, nach dem Schalle ihrer Tritte oder eines aufgestoßenen Stockes, sowie nach dem Eindrucke, den der Stimmlaut Sprechender auf sie macht, die Größe des Raumes sofort ziemlich richtig bezeichnen können. In ihnen bekannten Zimmern empfinden sie aus der Schallwirkung, dass ein größerer Hausrat, z. B. ein Schrank, ein hoher Schreibtisch usw. in ihrer Abwesenheit an einen andern Platz gerückt worden ist; sie nehmen ferner aus gleichem Grunde die Gegenwart anderer Personen wahr, obgleich diese sich bewegungslos und ruhig verhalten. Ebenso unterscheiden sie an der Stimme eines Sprechenden die nämlichen Dinge, die der Sehende aus dem Antlitz desselben herausliest: sie hören an der Stimme eines ihnen Unbekannten Geschlecht und Alter, und zwar das letztere oft in sehr feiner Unterscheidung bis auf wenige Jahre richtig, — sie erkennen an der Stimme einer ihnen genau bekannten Person, welche sie längere Zeit nicht sprechen gehört haben, dass dieselbe sich augenblicklich nicht wohl befindet, oder dass sie krank gewesen ist, wie wir das etwa aus der Blässe des Gesichts schließen, — sie hören der Stimme des Redenden genau die Gemütsbewegung und die geistige Stimmung an, welche wir aus dem Gesichtsausdrucke zu lesen gewöhnt sind.

Uebung scheint sogar Schallwellen noch auf einem anderen Wege zur Empfindung und zum Bewußtsein zu bringen, als auf dem Wege des Gehörorgans. Es gibt Taubstumme, welche nachweislich keine Spur von einer Gehörsempfindung besitzen, und welche doch eine Annehmlichkeit davon empfinden, dass in ihrer Nähe Musik gemacht wird. Es gibt vollständig taube Personen, welche mit einer gewissen Vorliebe Konzerte besuchen. Sie ziehen den Klang einer einzelnen Stimme, eines einzelnen Instrumentes der Massenwirkung des großen Orchesters vor. Ein Taubstummer, welcher in einer Anstalt (durch Ablesen der gesprochenen Worte vom Munde des Sprechenden und künstliches Nachbilden dieser Worte) gelernt hatte, sich mit seiner Umgebung zu verständigen, war regelmäßiger Konzertbesucher; als ein vertrauter Freund ihn frug, ob er die Musikaufführung mehr um der Hörer und der Hörerinnen wegen besuche, als der Musik wegen, leugnete er keineswegs die Anziehungskraft, welche eine geputzte größere Gesellschaft und der Anblick hübscher Frauengestalten für ihn, den vorzugsweise auf seine Augen Angewiesenen, habe, — bemerkte aber zugleich, dass er auch mit geschlossenen Augen sich sehr behaglich im Konzertsaale fühle, und dass er von der Musik eine angenehme Empfindung im Innern seines Leibes habe. Hier legte er die Hand auf die sog. Magengrube, da wo Brust und Bauch in einander übergehen. In dieser Gegend, wiederholte er, befinde sich für ihn der Sitz einer angenehmen Empfindung, wenn in seiner Nachbarschaft Musik gemacht werde. (Reklam, der Leib des Menschen.)

B. Das Gehörorgan der Tiere.

Frage 1185. Was ist im allgemeinen über das Gehörorgan der Wirbeltiere, besonders der höheren Wirbeltiere (Säugetiere und Vögel) im Vergleiche zu dem des Menschen zu bemerken?

Antwort. Das Gehörorgan der höheren Wirbeltiere entspricht bezüglich des Trommelfelles, der Paukenhöhle mit den drei Gehörknöchelchen und der Nervenausbreitung im inneren Ohre im allgemeinen dem Gehörorgane des Menschen, weicht aber von demselben bezüglich des äußeren Gehörganges wesentlich ab. (Siehe Erkl. 1105.)

Auch bei den Wirbeltieren liegt das Ohr, wenigstens so weit es den eigentlichen Hörapparat betrifft, tief im Innern des Kopfes; jedoch entsteht es im Embryo derselben als ein einfaches Grübchen in der äußeren Kopfhaut, welches allmählich tiefer in den Schädelknochen hineinwächst, die Verbindung mit der Außenwelt einbüßt und so das rings geschlossene, mit Flüssigkeit erfüllte sog. häutige Labyrinth darstellt, in dessen Innerem sich der Hörnerv verbreitet. Die knorpelige oder knöcherne Umgebung desselben, das knöcherne Labyrinth, ist oft viel geräumiger als das häutige, welches sich in mehrere Abschnitte sondert.

Gewöhnlich sind drei, nur selten ein oder zwei bogig gekrümmte Kanäle, die halbkreisförmigen Kanäle oder Bogengänge vorhanden, mit denen unmittelbar der Vorhof in Verbindung steht. Den Rest bildet ein besonderes Bläschen, an dem sich eine bei den niederen Wirbeltieren sehr kleine, bei den höheren ansehnliche Ausbuchtung befindet, die wegen ihrer Gestalt die Schnecke heißt und namentlich bei den Säugetieren stark entwickelt ist.

Erkl. 1103. Die Figur 649, Seite 403 ist eine schematische Darstellung des häutigen Labyrinths, und zwar unter *F* vom Fisch, *V* vom Vogel und *M* vom Menschen. *o* bezeichnet das ovale, *r* das runde Säckchen des Vorhofs, *c* die Schnecke, *l* die Vorhofswasserleitung, *h* die halbzirkelförmigen Kanäle, *g* die gemeinschaftlichen Vorhofssäckchen, *v* den Vereinigungskanal, *a* den Anfangsteil der Schnecke und *b* den Vorhofsblindsack.

Erkl. 1104. Der Kreis der Wirbeltiere, d. h. derjenigen Tiere, bei denen die Weichteile ihres Körpers von einem gegliederten knöchernen oder knorpeligen Skelett gestützt werden, umfaßt als Warmblüter die Säugetiere und Vögel, als Kaltblüter die Reptilien oder Kriechtiere, die Amphibien oder Lurche und die Fische.

Erkl. 1105. Erhebliche Unterschiede finden sich bei den Wirbeltieren im cortischen Organe: Bei dem Menschen und dem Affen liegt in halber Höhe der Spirale eine fünfte und nahe der Spitze eine 6. Reihe von Haarzellen, welche bei Schaf, Hund, Katze, Ratte, Meerschweinchen, Kaninchen, Tümmler und Känguruh fehlen. Diese Tiere müssen also andere Gehörsempfindungen haben, als der Mensch. Vielleicht ist dies der Grund, weshalb Hunde bei hohen Tönen durch Heulen Schmerz-

empfindungen kundgeben, während wir diese Töne mit Wohlgefallen hören. Wichtig ist die Uebereinstimmung im Gehörorgane des Menschen und des Affen, welche für die Abstammung beider von einem gemeinsamen Urahnen einen wichtigen Beweis liefert.

Anstelle der flachen Ohrmuschel des Menschen besitzt die Mehrzahl der Säugetiere ein trichterförmiges, zum Auffangen der Schallwellen ungleich besser geeignetes äußeres Ohr,

Zu diesen wesentlichen Teilen des Ohres treten nun verschiedene schallleitende Apparate hinzu, die zum Teil auf der Außenfläche des Kopfes beginnen, samt und sonders aber den Fischen noch fehlen. In der Wand des knöchernen Labyrinths bleibt eine kleine Stelle, das sog. ovale Fenster, unverknöchert und gestattet dort ein leichteres Eindringen der Schallwellen. Daran schließt sich nach außen zumeist ein Hohlraum,

Fig. 649.



welches aufrecht steht und durch seine Beweglichkeit das Tier befähigt, die Richtung zu erkennen, aus welcher die Schallwellen in sein Ohr gelangen. Bei einigen (z. B. Fledermäusen) ist der Umfang des äußeren Ohres viel größer als der des Kopfes; bei anderen z. B. Elefanten, Jagdhunden, Pudel hängen die Ohren in Form von großen Lappen herab, was die Tiere ungeschickt im Auffassen der Schallrichtung macht und durch den häufigen Wechsel des, infolge der Bedeckung erhitzten, und darauf durch kalten Wind übermäßig gekühlten äußeren Gehörganges, häufig zu Erkältungskrankheiten führt und schließlich bei Jagdhunden frühzeitige Taubheit bewirkt. Bei einigen Säuge-

die Paukenhöhle, der mit dem hintersten Teile der Mundhöhle, dem Rachen, durch die Ohrtrompete oder Eustachische Röhre in offener Verbindung steht, nach der Kopfhaut hingegen mittelst des dicht unter dieser gelegenen Trommelfelles geschlossen ist. (Eine Paukenhöhle fehlt z. B. den Schlangen und den geschwänzten Amphibien). Vom Trommelfell aus zum ovalen Fenster spannt sich quer durch die Paukenhöhle ein einziges oder eine Kette von Knöchelchen, die Gehörknöchelchen. Endlich tritt bei den Säugetieren und ganz vereinzelt auch bei anderen Wir-

tieren, welche Wasserbewohner sind (z. B. Seehunde, Schnabeltiere), fehlt die Hautfalte oder Ohrmuschel nahezu oder vollkommen.

beltieren ein äußeres Ohr auf, d. h. eine Oeffnung in der Haut, umgeben von einer durch Knorpel gestützten und durch Muskeln beweglichen Hautfalte. Die Oeffnung führt durch einen Kanal von verschiedener Länge, den äußeren Gehörgang, zum Trommelfell, das bei den Säugetieren gewöhnlich tief im Kopfe liegt.

Frage 1186. Was ist im allgemeinen über das Gehörorgan der Vögel zu bemerken?

Antwort. Den Vögeln, denen eine äußere Ohrmuschel gänzlich fehlt, kommt eine Paukenhöhle zu, die statt der drei Gehörknöchelchen einen einzigen stabförmigen, als Columella bezeichneten Knochen birgt, der das ovale Fenster verschließt, außer welchem sich auch ein durch eine Membran verschlossenes rundes Fenster vorfindet. (Siehe Erkl. 1106.) Statt der Steinsäckchen der Amphibien haben die Vögel einen geraden mit faserigen Nervenverbreitungen versehenen knöchernen Kanal, welcher als eine schwach entwickelte Schnecke anzusehen ist, während die halbzirkelförmigen Kanäle durch besondere Größe ausgezeichnet sind.

Erkl. 1106. Das runde Fenster fehlt allen den Tieren, die keine Schnecke haben, wie den Fischen und Amphibien, Insekten und Würmern. Etwas davon zeigt sich bei den Vögeln, wo ein schneckenähnlicher Kanal vorhanden ist. (S. Fig. 649.) Bei allen Arten von Säugetieren ist das runde Fenster vorhanden, und bei denen wo die Schnecke groß ist, z. B. bei dem Pferde, dem Kalbe, dem Delphin, ist es von ziemlicher Größe.

Frage 1187. Was ist über das Gehörorgan der Kriechtiere oder Reptilien besonders zu bemerken?

Antwort. Die Reptilien werden in der Regel ohne Trommelfell, Paukenhöhle und Eustachische Röhre angetroffen, und die Schnecke zeigt sich in Form eines einfachen Sackes, der ohne jede Windung ist. An Schildkröten und Eidechsen ist ein Trommelfell, eine Trommelhöhle, ein säulenförmiges auf verschiedene Art gestaltetes Gehörknöchelchen und eine Eustachische Röhre vorhanden.

Erkl. 1107. Bei vielen Reptilien, deren Ohr mit Trommelhaut versehen ist, liegt dieselbe frei nach außen, so dass sie durch die schwächsten Luftbewegungen leicht in Schwingungen geraten kann; hingegen ist bei denen, die mehr im Wasser leben, der Gehörapparat mehr durch harte und rauhe Decken gegen allzustarke Eindrücke gesichert.

Frage 1188. Was ist über das Gehörorgan der Fische zu bemerken?

Antwort. Das Gehörorgan der Fische (s. Fig. 649 *F*) ist wenig entwickelt; ein äußeres Ohr fehlt ganz, im Innern ist von der Schnecke höchstens eine Andeutung vorhanden. Das Ohr besteht in einem Sacke oder Vorhofe, welcher mit der Außenwelt in gar keiner Verbindung steht, und welcher einige Gehörsteinchen enthält, außerdem aber aus drei häutigen Kanälen, welche mehr in der Schädelhöhle selbst liegen, und welche das Labyrinth vorstellen. Der Gehörsteine sind gewöhnlich in jedem Ohre drei vorhanden, von sehr eigentümlicher Form, fast wie halbe Zitronenkerne, und am Rande gezähnelt. Oft sind sie sehr groß, z. B. bei den Schellfischen, Dorschen und Barschen.

Bei den Knorpelfischen ist auswendig keine Gehöröffnung sichtbar, und das ovale Fenster liegt gleich unter den allgemeinen Hautdecken und ist durch eine gespannte Membran geschlossen, hinter welcher sich der Vorhof mit drei häutigen Säckchen mit je einem Hörsteinchen befindet. Die Schuppenfische haben kein ovales Fenster und können also durch Erschütterungen des ganzen Kopfes hören und erhalten eine ziemlich lebhafte Empfindung von den unter Wasser hervorgebrachten Geräuschen, weil das Wasser ein ungleich besserer Schallleiter als die Luft ist. Statt des Vorhofes haben sie eine Höhle, die durch eine zarte Gefäßhaut von dem Gehirne abgesondert ist, worin ein Steinsäckchen und über diesem der Anfang der unbedeckten häutigen Bogengänge sich befindet.

Erkl. 1108. Bei vielen Fischen, besonders den Bauchflossern, besteht eine höchst merkwürdige Verbindung zwischen der Schwimmblase und dem Ohre. Es läuft nämlich vom Vorhofe jedes Ohres ein Kanal nach hinten, und diese beiden Kanäle vereinigen sich zu einem häutigen Schlauche, welcher das Hinterhaupt durchbohrt und unter dem ersten Wirbel in zwei blinden Säcken endigt. Von hier aber erstreckt sich zur Schwimmblase eine verbundene Reihe von drei Knöchelchen, von denen das erste jene blinden Säckchen berührt, während das dritte mit einem hakenförmigen Fortsatze an der Schwimmblase hängt. Durch einen Druck auf die Schwimmblase hebt sich das erste Knöchelchen augenblicklich. Es scheint, dass die Fische auf diesem Wege den Stoß und die Zitterungen eines Schalles vernehmen, was um so wahrscheinlicher wird, wenn man sieht, dass ein Fisch, welchen man in der Gefangenschaft gewöhnte, einem klingelnden Tone Folge zu leisten, ebenfalls herankommt, wenn man durch ein schwaches Blasen die Oberfläche des Wassers in eine zitternde Bewegung versetzt. Offenbar dröhnt ihm die Zitterung durch den Leib bis zur Schwimmblase, wie auch der Mensch den Schall einer Trommel im Bauche und Zwerchfelle fühlt und Taubstumme sogar auf diesem Wege die Töne der Musik vernehmen.

Frage 1189. Was ist über das Gehörorgan der Lurche oder Amphibien zu bemerken?

Antwort. Das Ohr der Amphibien ist äußerst unvollkom-

Erkl. 1109. Unter den Amphibien haben manche ein den Knorpelfischen (siehe vorstehend) gleichartiges Gehörorgan, bei andern ist der Bau des inneren Ohres wie bei den Schuppenfischen beschaffen, sie haben aber überdies auch eine äußere Ohrhöhle. Bei dem Wassersalamander besteht das Gehörorgan bloß aus dem ovalen Fenster, welches unter dem Gelenke des Unterkiefers tief hinten am Schlunde befindlich, und mit einem knorpeligen Deckel versehen ist, sowie dem Vorhofe, worin das eine weiße, kreideartige Masse enthaltende Säckchen liegt, und den häutigen Bogengängen wie bei den Knorpelfischen.

men; bei manchen Gattungen sieht man ein Trommelfell, wie beim Laubfrosche, bei andern ist solches überwachsen oder fehlt gänzlich. Die innere Ohrhöhle enthält weder eine Schnecke, noch ein Gehörknöchelchen; es findet sich nur eine, aus kohlensaurem Kalke bestehende, steinige Verhärtung. Dagegen scheint es, als ob diese Tiere mit der ganzen zarten Hautfläche ihres Körpers gegen die feinsten Zitterungen der Luft, wie z. B. die schwirrende Flügelbewegung eines fliegenden Insektes im höchsten Grade empfindlich sind, und es zeigt sich somit bei ihnen ähnlich, wie bei den Fledermäusen, eine eigentümliche Verschmelzung des Gehörs und des Tastsinnes.

Frage 1190. Den vorstehend erwähnten Wirbeltieren stehen die wirbellosen Tiere (Weichtiere, Gliederfüßer, Würmer usw.) gegenüber; was ist über das Gehörorgan dieser letzteren zu bemerken?

Antwort. Das Gehörwerkzeug fehlt manchen wirbellosen Tieren und besteht in seiner einfachsten Form aus einem mit Flüssigkeit gefüllten Bläschen, an dessen Wandung ein Nerv herantritt und sich ausbreitet, um die Schwingungen der Flüssigkeit im Zentralorgane des Nervensystems zur Wahrnehmung zu bringen. Zur Verstärkung derselben befinden sich in der Flüssigkeit meist ein oder mehrere Hörsteinchen aus Kalk, Kiesel, usw.; auch ragen häufig von den Zellen der Wandung des Hörbläschens Hörhaare bis an die Hörsteine heran. Das so gestaltete Ohr liegt durchaus nicht immer am Kopfe der Tiere, falls ein solcher überhaupt vorhanden ist, vielmehr in einzelnen Fällen in den Beinen (wie bei gewissen Heuschrecken), oder im Schwanze (wie bei einigen Krebsen); auch haben wohl Tiere außer diesen Gehörbläschen noch besondere Hörhaare, d. h. für Schwingungen empfängliche und mit

Erkl. 1110. Die in den Gehörblasen der Mollusken (oder Weichtiere), namentlich der Schnecken, befindlichen Gehörsteine, sind zur systematischen Einteilung verwendet worden. Dieselben bestehen entweder aus einem einzigen großen kugelrunden Steine, oder sie sind mit zahlreichen kleinen Gehörsteinchen (Otoconien) erfüllt. Es gibt nur wenig Gattungen der Weichtiere, bei welchen ein Teil der Arten große runde Steine, die andern kleine besitzen; in der Regel zeigen die Gattungen einer Familie auch übereinstimmende Formen der Hörsteine, und es gibt große, artenreiche Gruppen des Systems, bei welchen ausschließlich eine der beiden Formen von Hörsteinen angetroffen wird.

Man erkennt hieraus, dass diese frei liegenden Gehörsteine nicht zufällige Bildungen sind, indem der Kalk aus der Lösung sich niederschlägt, sondern dass ganz bestimmte, wenn auch zur Zeit noch unbekannte Verhältnisse vorliegen müssen, welche die Form der Gehörsteine bestimmen.

einem Nerv versehene Haare an anderen Körperstellen.

Die Hörsteine werden bei einer Gruppe der höheren Krebse von den Tieren selbst mittelst ihrer Scherenfüße in die mit einer feinen Oeffnung versehenen Ohrblasen befördert, gewöhnlich jedoch bilden sie sich im Innern der geschlossenen Blasen als Niederschläge aus den Körpersäften.

Frage 1191. In welcher Weise hat man die G e h ö r f ä h i g k e i t der zu den Weichtieren gehörigen S c h n e c k e n und ihre einfachen Gehörorgane geprüft?

Erkl. 1111. Hermann v. Ihering berichtet folgendes: „Ich nahm, um mir über die Einwirkung der Töne auf die große Weinbergschnecke Klarheit zu verschaffen, ein Instrument, das Cello, zu Hilfe. Strich ich nun in unmittelbarster Nähe des Tieres die Saiten fest an, so erfolgte doch keinerlei Reaktion des sorglos weiter kriechenden Tieres. Anders jedoch, wenn ich die Schallwellen nicht durch die Luft, sondern durch feste Körper zuleitete. Ich nahm, um jede direkte Erschütterung des Tieres zu vermeiden, ein längeres Stück des feinen Kupferdrahtes, mit welchem die *C*-Saite des Cello umsponnen ist, und band ihn an die genannte Saite des Instrumentes fest. Das andere Ende führte ich unter der Fußsohle des Tieres hin, mit welcher es auf einem auf den Tisch gelegten Stück Papier ruhte. Sobald nun das Tier, mit den ausgestülpten Fühlern nach den Seiten hin tastend, ruhig weiter kroch, strich ich in Entfernung von etwa 1 m von dem Tiere die *C*-Saite fest an. Sofort zog die Schnecke die Fühler rasch ein, um sie bald darauf wieder auszustrecken, bei neuen Strichen aber sogleich wieder einzuziehen. Es dürfte durch dieses Experiment wohl dargetan

Antwort. Indem man sich der in beständiger Bewegung befindlichen Fühler als eines trefflichen Erkennungsmittels für den Grad der Einwirkung äußerer Reize bediente. Bei jeder Berührung, Erschütterung, usw. antwortet das Tier mit einem Einziehen der Fühler, und daraus, dass diese oder irgend welche sonstigen Erscheinungen bei der Erzeugung von Tönen in der Nähe des Tieres nicht eintreten, würde zu folgern sein, dass die Töne nicht gehört werden. Es ergab sich aber aus dem in nebenstehender Erkl. beschriebenen Versuche, dass die Schnecken nicht taub sind. Dehnen wir die Ergebnisse dieses Versuches auf alle Schnecken aus, welche mit breiter Fußsohle kriechen, so würden alle diese Tiere die Schallwellen nicht durch die Luft, sondern durch die Unterlage, auf welcher sie kriechen, zugeleitet erhalten; dem entspricht die Lagerung der Gehörblase im Körper des Tieres: unmittelbar auf der Fußsohle, nicht im Kopfe. Dagegen bei den Kielfüßern (Heteropoden), welche den Schnecken in jeder Beziehung so nahe stehen, dass sie zu ihnen gerechnet werden, bei denen aber der Fuß in eine Schwimmflosse umgewandelt ist, findet sich die Hörblase im Kopfe, unmittelbar unter der äußeren

sein, dass die Heliciden die Töne nicht aus der Luft aufnehmen, sondern durch den Boden, auf dem sie kriechen, zugeleitet bekommen, gleichviel, ob dabei mehr der Ton oder die Erschütterung zur Wahrnehmung gelangt; denn um etwas anderes wie Erschütterungen handelt es sich schließlich bei der Schalleitung durch feste Körper nicht."

Haut, also den Schallwellen des Wassers und der Luft zugänglich.

Grant schloß das Vorhandensein eines Hörorgans bei den bauchkriechenden Schnecken aus der Tatsache, dass eine Art derselben gewisse Töne von sich gibt, die ohne Zweifel dazu bestimmt sind, von den Genossen vernommen zu werden.

Frage 1192. Was ist über die besonderen Grundformen der Gehörorgane der Insekten zu bemerken?

Antwort. Die Gehörorgane der Insekten sind entweder saitenartig (chordotonal) oder trommelartig (tympanal).

Die chordotonalen Organe kommen in weiter Verbreitung vor und sind saitenartig zwischen zwei Stellen der Körperwand in der Leibeshöhle ausgespannte Stränge. Dieselben bestehen aus einer Gruppe langgestreckter Sinneszellen, welche einerseits an die Haut reichen, am andern Ende durch ein Band befestigt sind. Der Nerv tritt seitlich an die am untern Ende umgebogenen Sinneszellen heran, welche sog. Stifte, (tief eingesenkte Sinnesgruben mit ihren Sinneskegeln) enthalten. Es besteht die Vorstellung, dass diese Saiten, durch Schallwellen in Schwingungen versetzt, Gehörempfindungen vermitteln können.

Die tympanalen Gehörorgane werden bei den mit Zirporganen begabten Geradflüglern beobachtet. Sie sind mit den saitenartigen Organen nahe verwandt und unterscheiden sich von denselben durch das Hinzutreten schallverstärkender Apparate. Der Ueberzug der Haut ist an diesen Stellen verdünnt und von einem verdickten Rahmen umgeben, in welchem

Erkl. 1112. Die Gehörorgane treten in den folgenden Grundformen auf:

1) Gehörkölbchen, wie sie sich am Scheibenrande gewisser Hydromedusen in Gestalt kleiner Fühlfäden finden. In den äußersten Achsenzellen finden sich Gehörsteine. Als Sinneszellen fungieren die Hautzellen der Kölbchen oder die Zellen an der Basis derselben. Alle diese Zellen tragen lange Sinneshaare. Die Kölbchen sind in manchen Fällen von einer Hautfalte umwuchert und dadurch in ein (zuweilen noch offenes) mit Seewasser erfülltes Bläschen eingeschlossen.

2) Gehörgruben finden sich bei den Vesiculaten unter den Hydromedusen und können sich bei manchen Formen zu mit Seewasser gefüllten Bläschen schließen. Die Gehörgruben werden von Hautzellen ausgekleidet, deren einige blasig vorspringen und Krystalle enthalten. Jeder krystallhaltigen Zelle liegen Reihen von Sinneshaaren an, deren bügelförmig gebogene Haare die Krystallzellen berühren.

Auch das im Basalgliede des ersten Fühlhornes gelegene Gehörorgan der zehnfüßigen Krustentiere gehört diesem Typus an. Es ist eine durch eine Spalte geöffnete Grube der Haut, die mit von außen eingedrungenem Wasser erfüllt ist. An der Wand der Grube erhebt

sich eine Leiste mit zarten, beweglich eingelenkten Sinnesborsten. Die Gehörsteine sind hier aufgenommene Sandkörnchen.

3) Gehörbläschen. Solche finden sich bei Hydromedusen, Würmern, sowie Mollusken. Die Wand der Blase wird von einem zarten Oberhäutchen gebildet, in welchem Sinneszellen und in der Regel Flimmerzellen zu unterscheiden sind. Die Sinneszellen können auch an einer Stelle zu einem akustischen Fleck gehäuft sein. Das Bläschen ist mit Flüssigkeit erfüllt und enthält einen abgesetzten großen oder zahlreiche kleine Otolithen.

Das Gehörorgan der Wirbeltiere (Vertebraten) ist gleichfalls auf ein von der Oberhaut abgeschnürtes Bläschen zurückzuführen (Fig. 649), welches in seltenen Fällen den Zusammenhang mit der Haut noch bewahrt, doch bleibt das Bläschen nicht einfach, sondern erfährt eine Reihe von Verwickelungen, und ist als häutiges Labyrinth bekannt, was wir, nebst den übrigen Teilen des Gehörorgans, bereits kennen lernten.

4) Die (in nebenstehender Antwort bereits erwähnten) saitenartigen und trommelartigen Sinnesorgane der Insekten.

der verdünnte Teil trommelfellartig ausgespannt erscheint. Zuweilen ist das Trommelfell eingesenkt und sogar von einem durch eine Hautverdoppelung gebildeten Deckel überwölbt. Hinter dem Trommelfell findet sich eine blasenförmige Erweiterung der Luftröhre (Trachee), und an dem Trommelfell, zwischen diesem und der Blase, oder in die Tiefe an die Tracheenblase verlagert, liegen die gruppen- oder reihenweise angeordneten Sinneszellen mit Stiften.

Frage 1193. Was ist über den Sitz des Gehörorgans bei den Insekten zu bemerken?

Erkl. 1113. Wenn sich der Käfer Copris molossus bewegt (sagt Newport) so sind die blattförmigen Glieder seiner Fühler so weit wie möglich ausgestreckt, als ob sie dem Tiere auf seinem Marsche die Richtung angeben. Sobald aber ein lautes plötzliches Geräusch erschallt, werden sie sofort zusammengeklappt und die Antennen werden zurückgezogen, als ob sie durch die Erschütterung verletzt wären, das Insekt selbst macht Halt und stellt sich tot. Diese Tatsachen zusammen mit

Antwort. Ueber den Sitz des Gehörorgans bei den Insekten gehen die Meinungen der Gelehrten sehr auseinander. Besonders wurden auch die Fühlhörner als Ohren betrachtet, und z. B. von Kirby beobachtet, dass ein kleiner Nachtfalter bei einem leisen aber deutlichen Tone seine Fühler sofort der Schallquelle zuwandte, und dieselbe Schallwirkung zeigte sich bei einem kleinen Rüsselkäfer. Andererseits hat schon vor langer Zeit Lehmann beobachtet, dass das Heimchen, nachdem es seiner Fühler beraubt wurde, für Schall so empfänglich bleibt, wie vorher. Zweifellos dienen bei manchen In-

den Resultaten anderer Experimente überzeugten den genannten Forscher, dass bei allen Insekten die Fühler die Gehörorgane sind, und dass ihre Struktur, wie verschieden auch immer, dazu geeignet ist, den Schall zu empfangen und zu übermitteln.

Will hat bei einem Cerambyx-(Bockkäfer-)pärchen beobachtet, dass das Männchen von einem in einer Schachtel versteckt gehaltenen Weibchen nicht eher eine Ahnung hatte, als bis letzteres anfing zu geigen (d. h. durch Reiben der Ränder seines vorderen und mittleren Brustpanzers feine Töne zu erzeugen). Beim ersten Ton wurde das Männchen unruhig, streckte seine Fühler aus, drehte sie um und um, als wollte es damit wahrnehmen, aus welcher Richtung der Ton käme, und marschierte darauf geradeswegs auf das Weibchen zu. Will hat diese Versuche häufig, und zwar immer mit demselben Erfolge wiederholt.

Ein ruhig dahin marschierender Bockkäfer, der plötzlich durch ein lautes Geräusch überrascht wird, richtet unabänderlich seine Fühlhörner nach außen und hält dieselben ausgestreckt, als wäre er, solange er horcht, voll gespannter Aufmerksamkeit, und setzt behutsam seinen Weg fort, wenn er bemerkt, dass das ungewohnte Geräusch nicht mit Gefahr für ihn verbunden ist.

Hicks fand (1856), dass die Hinterflügel der Fliegen und Mücken, obwohl sie zu zwei kleinen kolbenförmigen Organen reduziert sind, doch einen Nerven empfangen, also der Sitz irgend eines Sinnes sind. Derselbe Forscher fand an dem Grunde der Schwingkölbchen (oder Halteren) eine Anzahl von Bläschen in vier Gruppen verteilt, zu deren jeder der Nerv einen Zweig entsandte. Nach Bolles Lee's Untersuchungen (1885) sind diese Bläschen durchbohrt und enthalten ein kleines Haar und könnten also wohl als Gehörorgan dienen.

sekten die Fühler als Ohren, während bei anderen der Sitz des Gehörsinnes vielleicht in mehreren Körperteilen zugleich zu suchen ist.

Bei den Laubheuschrecken und den Grillen liegt das Gehörorgan in dem Schienbeine des Vorderbeines. Hier befindet sich jederseits eine mehr oder weniger ovale Scheibe, die sich dadurch von ihrer Umgebung unterscheidet, dass sie aus einer dünnen, straff gespannten, glänzenden Haut besteht, welche ganz, oder zum Teil mit einem kleinen Wall umgeben ist. Bei manchen Arten sind diese Trommelfelle von einer Hautfalte überdeckt. Der starke Hörnerv teilt sich nach seinem Eintritt in das Schienbein in zwei Zweige: der eine bildet das Obertrommelfellnervengewebe, der andere steigt zum Trommelfell herunter und breitet sich hier in Gestalt einer länglichen, flachen Nervenverwebung aus, an deren oberem Ende eine Gruppe von Bläschen sitzt, während ebensolche sich weiter abwärts in eine einfache Reihe ordnen. Während die obersten dieser Bläschen nahezu gleich sind, nehmen die andern nach unten hin stetig an Größe ab. Ein jedes Bläschen steht mit dem Nerven mittelst eines Fäserchens in Verbindung und enthält einen Hörstift. Diese, bei vielen Insekten entdeckten Hörstifte sind stark lichtbrechend, schlank keulenförmig, hohl und fast immer von gleicher Länge. Die erwähnte einfache Reihe von Zellen, die von oben nach unten stufenweise an Größe abnehmen, scheinen in Beziehung zur Aufnahme verschiedener Noten zu stehen, wie es mit der Reihe der sich kontinuierlich verkleinernden Cortischen Bögen in unserem Ohre der Fall ist. Auch die Obertrommelfell-Nervenfasern lösen sich in eine Anzahl Hörstifte enthaltender Bläschen auf.

Die Schwingungen der Atmosphäre können dem Nerven auf zweierlei Weise mitgeteilt werden: entweder die Schwingungen des Trommelfells wirken auf die Luft in der sich in das Schienbein verzweigenden Luftröhre und damit weiter auf die Hörstifte, oder die Luft in der Trachea (Luftröhre) verhält sich ganz passiv und die Schwingungen wirken auf die Hörstifte durch die in einem Längsraume des Schienbeines befindliche Flüssigkeit.

Bei den Feldheuschrecken liegt das Gehörorgan nicht in dem Schienbeine, sondern im ersten Segmente des Unterleibes. Aeußerlich ist es kenntlich durch seinen Glanz und seine ovale Gestalt. Hinter dem Trommelfell, dessen Spannung durch einen, in einzelnen Fällen auch durch zwei Muskeln reguliert wird, ist eine große Tracheen- (d. h. Luftröhren-)blase. Das Gehörorgan der Ameisen gleicht in der Hauptsache dem der Laubheuschrecken.

Frage 1194. Wie sind die Gehörwerkzeuge bei den Krebsen angeordnet?

Erkl. 1113b. Die Hörorgane der Quallen, welche je nach den Arten in der Zahl von 60 bis 600 steigen, treten in drei Typen auf.

1) Als eine offene von Zellen ausgekleidete Grube. Die meisten dieser Zellen an der Außenseite der Grube enthalten einen Otolith, während die an der gegenüberliegenden Seite angeordneten zungenförmig sind und am freien Ende als Hörhärchen endigen, die bis an jene die Otolithen enthaltenen Zellen reichen, während ihre inneren Enden mit den Nervenfasern des Nervenrings in kontinuierlichem Zusammenhange stehen.

Antwort. Das Gehörorgan der Krustentiere oder Krebse besteht aus einem in der etwas angeschwollenen, verdickten Basis oder dem ersten Abschnitte des kleinen Antennen- (oder Fühlhörner-) paares gelegenen Sacke, welcher bei manchen Arten durch behaarte Oeffnungen mit dem Wasser in Verbindung steht, bei anderen geschlossen ist, aber die Lage des Gehörsackes deutlich erkennen läßt. In beiden Fällen enthalten die Säcke Otolithen. Letztere sind gewöhnlich Sandpartikelchen, welche die Tiere auflesen und selbst in ihren eignen Gehörsack hineinstecken, wie durch die Beobachtungen Hensens zweifellos

2) Die Grube ist zu einer Blase geschlossen, und die Otolithen sind weniger zahlreich, ja bei einer Art findet sich nur ein einziger.

3) Die Gehörorgane stellen sich (wie bei den Trachymedusen) als umgebildete Fühlhörner dar. Jedes bildet einen keulenförmigen Körper, der in seiner Spitze einen oder mehrere Otolithen enthält.

Bei den Würmern und Mollusken besteht das Hörorgan aus einer geschlossenen Blase, die einen oder mehrere Otolithen enthält und von Nervenzellen ausgekleidet ist. Diese sind an ihrer Basis mit den Hörnerven verbunden und tragen am freien Ende Borsten.

dargetan ist. Bei den echten Krabben scheinen die Otolithen immer zu fehlen, so dass hier die Hörhaare ohne Zutun der Otolithen in Schwingungen gebracht werden.

Die Gehörorgane der Krustentiere bieten bei den einzelnen Arten eine endlose Reihe von Verschiedenheiten. Bei den höheren Formen ist der Hörsack immer an der Basis der kleineren Antennen, bei einer der niederen indessen, bei dem Geschlechte Mysis, sitzt das Ohr im Schwanze. Der Schwanz dieser Krebsart, welche in ihrer äußeren Form den Garneelen gleichen, besteht, wie ein Hummerschwanz aus fünf Lappen und enthält in jedem der beiden kleinsten einen einzelnen, linsenförmigen Otolithen. Strychnin besitzt die Eigenschaft, die Reflexfähigkeit der nervösen Zentren zu vermehren. Diese Tatsache benutzte Hensen, indem er einige Garneelen in Seewasser mit einem Strychninzusatz brachte, und er bemerkte, dass die Tiere darauf auch für die leisesten Töne außerordentlich empfindlich wurden. Außerdem fand er, dass die verschiedenen Hörhaare durch verschiedene Töne erregt werden. Die Schwingungen der Haare kommen rein mechanisch zustande, gleichviel ob das Tier lebt oder nicht. Hensen befestigte eine Mysis derart, dass er einzelne ihrer Hörhaare mit dem Mikroskope beobachten konnte, und ließ eine Skala ertönen. Bei den meisten Noten blieben die Haare ganz ruhig, auf manche indessen reagierten sie so stark und gerieten dabei in so lebhafte Schwingungen, dass sie unsichtbar wurden. Verstummte der Ton, so kamen auch die Haare zur Ruhe, sobald er wieder angestimmt wurde, fing auch das Haar sofort wieder an zu schwingen. Andere Haare reagierten ebenso auf andere Töne.

Anmerkung XXXX. Manche Forscher haben vermutet, dass die halbzirkelförmigen Kanäle des menschlichen Ohres neben ihrer Beteiligung am Hörprozess die Funktion haben, die Gleichgewichtsstellung des Körpers wahren zu helfen. Eins ist gewiß, wenn sie verletzt sind, so werden die Bewegungen sehr oft unregelmäßig, ungeordnet, und die Otolithensäckchen der niederen Tiere scheinen eine ähnliche Funktion zu haben, d. h. Drehungsempfindungen zu vermitteln, also das Tier über die Lage und Bewegung des Körpers im Raume zu orientieren. Es gründet sich diese Ansicht auf Versuche bei niederen Tieren, im Anschluß an jene bei Wirbeltieren. Nach Mach hat sich das Gehörorgan aus einem Tastorgan durch Anpassung an periodische Reize entwickelt, weshalb die Beziehungen desselben zur Bewegung nicht überraschend sind. Das Ohr der Säugetiere besitzt stets die drei Gehörknöchelchen, Hammer, Amboß und Steigbügel, und bei allen höheren Ordnungen, namentlich aber bei den Landbewohnern, eine oft sehr große Muschel. Die Hörfähigkeit der Säuger ist sehr verschieden. Taub ist kein einziger von ihnen. Wirklich feinhörig aber sind nur wenige. Der Gehörsinn erreicht in der Klasse der Säuger eine Entwickelung wie in keiner andern. Derselbe ist zwar schon bei den tiefer stehenden Klassen des Tierreichs ziemlich ausgebildet, jedoch nirgends in dem Grade, dass er zum Leben, beispielsweise zum Aufsuchen der Beute oder Nahrung unumgänglich nötig wäre. Dies ist erst bei den zwei oberen Klassen der Fall; allein das vollkommenste Ohr der Vögel erscheint immer nur als eine Nachbildung des Säugetierohres. Dass die Vögel ganz vortrefflich hören, geht schon aus ihren tonkünstlerischen Begabungen hervor: sie erfreuen und beleben sich gegenseitig durch ihren liederreichen Mund und durch ihr Gehör, welches ihnen eben das Reich der Töne erschließt. Es ist aber bemerkenswert, dass auch unter ihnen nur diejenigen liederbegabt sind oder nur diejenigen sich in Klängen und Tönen berauschen, welche das am wenigsten entwickelte Gehör besitzen, während den Feinhörigen, allen Eulen z. B., dieselben Töne, welche andere Vögel entzücken, ein Greuel sind. Geradeso ist es bei den Säugern. Hier zeigt schon der äußere und noch mehr der innere Bau des Ohres die höhere Begabung des entsprechenden Sinnes an; die Begabung aber kann sich so verfeinern, dass ihm Klänge, welche stumpferen Ohren wohllautend erscheinen, gellend oder unangenehm werden. Ein musikalisches Gehör ist deshalb keineswegs ein gutes oder feines zu nennen; es steht vielmehr auf einer tieferen Stufe der Entwickelung als das eines wirklich feinhörenden Tieres, und wenn man von seiner Ausbildung spricht, kann man immer nur eine bezügliche meinen.

Das äußere Ohr gibt einen so ziemlich richtigen Maßstab zur Beurteilung der geringeren oder größeren Entwickelung des Sinnes; d. h. alle Tiere, welche große, stehende und bewegliche Ohrmuscheln besitzen, hören besser als diejenigen, deren Ohrmuscheln hängend, klein oder gar verkümmert sind. Mit dem äußerlich verbesserten Sinneswerkzeuge vermehrt sich die Empfänglichkeit für die Töne; um es mit wenig Worten zu sagen: großohrige Säuger hassen, kleinohrige lieben Töne und Klänge. Der Delfin folgt entzückt dem Schiffe, von dessen Bord Musik zu ihm herabklingt; der Seehund erscheint an der Oberfläche des Wassers, wenn der Fischer leise und klangvoll pfeift; das Roß wiehert vor Lust beim Schmettern der Trompeten; das Kamel stelzt frischer dahin, wenn die Zugglocke läutet; der Bär erhebt sich beim Tone der Flöte; der Elefant, welcher wohl einen großen Ohrlappen, aber keine große Ohrmuschel besitzt, bewegt seine Beine tanzartig bei der Musik, unterscheidet sogar schmelzende Arien von kräftigen Märschen oder Kriegsgesängen. Aber keines dieser Tiere gibt einen für uns angenehmen, wohltönenden Laut von sich wie die tonbegabten Vögel,

welche die Musik lieben und durch sie zum Singen und Jubeln aufgemuntert werden; sie ähneln vielmehr noch den Lurchen, der Schlange z. B., welche von der Pfeife ihres Beschwörers herbeigelockt, ja gebändigt wird. Anders benehmen sich die feinhörigen Säuger beim Empfinden der Töne und Klänge, welche ihren Ohren zu stark sind. Der Hund erträgt den Baß des Mannes, nicht aber den Sopran der Frau; er heult beim Gesange des Weibes wie bei Tönen aus Blaswerkzeugen, während er die milderen Saitentöne schon viel besser leiden mag. Noch auffallender geberdet sich eine großohrige Fledermaus, wenn sie Musik hört: sie gerät in peinliche Unruhe, zuckt mit den Vordergliedern und begleitet die äußeren Bewegungen mit zitternden Lauten ihrer Stimme; ihr sind die starken Töne geradezu entsetzlich.

Uebrigens läßt sich über die wirkliche Schärfe des Gehörsinnes nichts Bestimmtes sagen. Wir sind nur imstande, bei den einzelnen Tieren von bezüglicher Schärfe zu reden; die Höhe der Entwickelung des Sinnes läßt sich nicht messen. Dass sehr viele Säuger noch Geräusche hören, welche wir durchaus nicht mehr wahrnehmen können, ist sicher: wie weit dies aber geht, wissen wir nicht. Es steht wohl fest, dass eine Katze wie die Eule das Geräusch, welches eine Maus beim Laufen verursacht, vernimmt; allein wir vermögen nicht zu bestimmen, auf welche Entfernung hin sie die leisen Fußtritte noch vom Rascheln des Windes unterscheiden können. Die großohrige Fledermaus hört wahrscheinlich das Fluggeräusch kleiner Schmetterlinge, von deren Bewegung wir entschieden nichts mehr durch den Gehörsinn wahrnehmen können, der Wüstenfuchs vielleicht das Krabbeln eines Käfers im Sande noch auf ein gutes Stück; das Wild vernimmt den Schall der Fußtritte des Jägers auf hundert, vielleicht zweihundert Schritte: alle diese Angaben aber beweisen gar nichts und gewähren uns keinen Anhalt zu genauer Bestimmung.

Das Ohr der Flattertiere besteht aus einer sehr großen Ohrmuschel, welche oft bis gegen den Mundwinkel ausgezogen, mit besonderen Lappen und Ausschnitten versehen ist und außerordentlich leicht bewegt werden kann. Zudem ist noch eine große, bewegliche, verschiedenartig geformte Klappe, der Ohrdeckel, vorhanden, welcher dazu dient, bei stärkeren Geräuschen oder Tönen, als die Fledermaus sie vertragen kann, das Ohr zu schließen und ihr somit eine Qual zu ersparen, während dasselbe Anhängsel, wenn es gilt, ein sehr leises Geräusch zu vernehmen, befähigt, auch einen schwachen Schall aufzufangen. Es ist unzweifelhaft, dass die Fledermaus vorbeifliegende Kerbtiere schon in ziemlicher Entfernung hört und durch ihr scharfes Gehör wesentlich in ihrem Fluge geleitet wird. Schneidet man die blattartigen Ansätze oder die Ohrlappen und Ohrdeckel ab, so werden alle Flattertiere in ihrem Fluge irre und stoßen überall an.

Ist die Fledermaus sehr aufmerksam, so richtet sie das Ohr ganz empor, und es starrt dann gespreizt, bei den großohrigen Arten sogar etwas nach vorn übergeneigt zur Aufnahme der Erregungen, welche etwa von einem summenden Kerbtiere oder von einem Luftzuge ausgehen. Befindet sie sich in tiefster Ruhe, so ist das Ohr am Außenrande so sehr in Falten gelegt, dass es sich nach hinten und nach außen fest an den Kopf andrückt; ist sie nicht sehr erregt, ruht aber auch nicht vollständig, so nimmt das Ohr irgend eine mittlere Lage an. — Es scheint, dass die Fledermäuse nur für ähnlich schwirrende Töne wie ihr Schrei oder wie das Summen der Kerbtiere nicht aber für andersartige Laute und Getöse, für einen Knall, lautes Reden und Rufen und dergl. empfänglich sind. Hält man eine Zwerg- oder Ohrenfledermaus mit einer Mücke zusammen in einer mit Glas bedeckten Schachtel, so sieht man das Tier sofort aufs äußerste

lebhaft, sobald die Mücke zu fliegen beginnt: es spreizt die Ohren, schnappt mit dem Munde umher, und man sieht deutlich, dass es nicht sowohl durch das Gesicht als vielmehr durch das Gehör geleitet wird. Fast möchte es scheinen, als wenn es das Schwirren des Kerbtieres schärfer und sicherer vermittelst der Ohrhäute fühle als durch das Gehör wahrnähme.

Das Gehör ist unzweifelhaft das Werkzeug, welches die Raubtiere bei ihren Raub- und Streifzügen leitet. Sie vermögen Geräusche auf große Entfernungen hin wahrzunehmen und richtig zu beurteilen, vernehmen den leisesten Fußtritt, das schwächste Rascheln im Sande und finden durch ihr Gehör selbst nicht gesehene Beute auf. Diese Sinnesschärfe scheint schon äußerlich angedeutet zu sein; denn obschon die Ohrmuscheln fast nirgends besonders groß zu sein pflegen, zeigen sie doch hier und da besondere Verzierungen oder Anhängsel durch steife Haare usw., welche zwar weniger zur Auffangung des Schalles dienen, aber doch den hervorragendsten Sinn kennzeichnen dürften.

Die großen Ohröffnungen der Vögel liegen seitwärts am hinteren Teile des Kopfes und sind bei den meisten Vögeln mit strahligen Federn umgeben oder bedeckt, welche die Schallwellen nicht abhalten. Bei den Eulen wird die Muschel durch eine häutige, höchst bewegliche, aufklapp- und verschließbare Falte ersetzt. Das Paukenfell liegt nahe am Eingange; der Gehörgang ist kurz und häutig, die Paukenhöhle geräumig. Anstatt der drei Gehörknöchelchen der Säugetiere ist nur ein einziger vieleckiger Knochen vorhanden, welcher mit dem Hammer einige Aehnlichkeit hat und gleichzeitig Steigbügel und Amboß ersetzen muß.

Besonders hoch entwickelt ist das Gehör bei den Raubvögeln, am höchsten überhaupt bei den Eulen. Die äußere Ohröffnung ist bei der Mehrzahl der Eulen eine Falte, welche von oben nach unten sich um das Auge herumzieht und aufgeklappt werden kann. Hierdurch entsteht eine sehr weite, durch die strahligen Federn ringsum noch vergrößerte Muschel, welche sich bei mehreren Arten so weit öffnet, dass man bei aufgehobener Falte einen großen Teil des Auges liegen sieht.

Das Gehör der Kriechtiere steht dem der höheren Tiere entschieden nach: dem Ohre mangelt die Muschel, und das Innere der Höhle ist weit einfacher als bei den warmblütigen Wirbeltieren. Doch besitzen die Kriechtiere noch die Schnecke, welche bald einen rundlichen, häutigen Sack, bald einen kurzen Kanal mit einer unvollständigen, schraubig gewundenen Scheidewand und einem flaschenförmigen Anhang darstellt. Das innere Ohr ist hiermit in seinen wesentlichsten Teilen vorhanden, und seine weitere Ausbildung bei Vögeln und Säugetieren gibt sich nicht mehr durch Vermehrung der Teile, sondern nur durch größere Ausarbeitung derselben kund. Das mittlere Ohr und die Paukenhöhle sind vielfach verschieden. Bei den Schlangen fehlt letztere durchaus, und ist auch kein Trommelfell und keine Eustachische Trompete vorhanden; bei den übrigen Ordnungen wird die Paukenhöhle nach außen hin durch das mehr oder weniger freiliegende Trommelfell geschlossen und mündet nach innen hin durch eine kurze und weite Trompete in den Rachen. Zwischen dem Trommelfelle und dem ovalen Fenster ist die Verbindung durch das oft sehr lange Säulchen hergestellt, an welches sich bei einzelnen noch andere Knöchelchen anschließen.

Versuche, welche Lenz und andere anstellten, ergaben, dass sich Schlangen an verschiedene Töne wenig oder nicht kehren, wenn dieselben nicht die Luft oder den Boden stark erschüttern. Dagegen haben nun alle Reisenden, vor denen Schlangenbeschwörer Indiens und Aegyptens ihre Gaukeleien ausführten,

beobachtet, dass die Schlangen nach den Tönen einer Pfeife eigentümliche Bewegungen ausführen. Auch Brehm glaubt auf Grund eigner Anschauung, dass sich die Schlangen einigermaßen an die gellenden Töne der von den Schlangenbeschwörern gehandhabten Blaswerkzeuge kehren.

Bei den Schwanzlurchen ist nur das Labyrinth vorhanden, bei den Froschlurchen eine Paukenhöhle mit Trommelfell und kurzer eustachischer Trompete. Das Labyrinth selbst besteht aus drei halbzirkeligen Röhren mit einem Sacke, welcher mit kleinen Kalkkristallen erfüllt ist, und hat eine eiförmige Oeffnung, welche bald durch einen Deckel, bald durch eine dünne Haut, bald durch Muskeln und Haut bedeckt wird.

Dass die Fische hören, trotzdem sie weder ein Trommelfell noch Gehörknöchelchen besitzen, unterliegt keinem Zweifel, da man gezähmte durch den Laut einer Glocke herbeilocken oder bemerken kann, dass scheuere bei lautem Geräusche entfliehen; schwerlich jedoch ist man zu der Annahme berechtigt, dass sie verschiedene Töne unterscheiden.

Wie jedes Sinneswerkzeug, bestehen auch die Gehörwerkzeuge der Krebse aus einem die äußeren Eindrücke aufnehmenden und leitenden Apparate, der geradezu mit einem für einen bestimmten Zweck gebauten physikalischen Instrumente verglichen werden kann, und aus einem Nerv, auf welchen jene Eindrücke (Schallwellen) übertragen und von dem sie dem Gehirne zu weiterer Verarbeitung übermittelt werden. Der physikalische Apparat des Gehörorganes muß geeignet sein, durch die Schallwellen leicht in Zitterungen versetzt zu werden und wird um so künstlicher und vollkommener, auf je feinere Unterschiede der Wellen er in verschiedener Weise seinerseits antworten kann, und je mehr auch die feinsten Formbestandteile des Nervs diesen Nüancen des aufnehmenden Apparates entsprechen. Ein haarförmiger Fortsatz, welcher von den Schallwellen in Zitterungen versetzt wird und diese Zitterungen auf einen an seine Wurzel sich anlegenden Nerv überträgt, kann demnach ein wenn auch in dieser Einfachheit sehr unvollkommenes Gehörorgan sein. Nach diesem einfachen Grundplane sind die Gehörwerkzeuge aller der Krebse gebaut, welche sich dem Flußkrebse anschließen. In der Basis ihrer inneren Antennen (Fühlhörner) ist ein geschlossenes oder mit einem nach außen sich öffnenden Spalte versehenes Säckchen enthalten, auf dessen Innenwand einige Reihen von Haaren, oder viele federförmige oder einfachere Haare sich befinden. Die Erzitterungen des die geschlossene Höhle ausfüllenden Gehörwassers, des gewöhnlichen Wassers bei offener Höhle, übertragen sich auf die Gehörhaare, und die Wirkung wird verstärkt durch die sog. Gehörsteine. Der genaue Beobachter dieser Verhältnisse, Professor Hensen, sah, wie ein kleiner Seekrebs sich seine Ohren voll feinen Kies stopfte und somit die verloren gegangenen Gehörsteine ergänzte. Höchst interessant sind auch die von dem Genannten angestellten Versuche, sich die Ueberzeugung zu verschaffen, dass die Krebse wirklich hören. (Siehe Antwort auf Frage 1194.)

Andere Versuche bezogen sich auf das Wie der Tonempfindungen. Sollten die Krebse ähnlich wie Menschen hören, so ließ sich voraussetzen, dass die in Länge und Dicke verschiedenen Höhrhaare auch nur von verschieden hohen Tönen würden in Schwingungen versetzt werden. Auch dies konnte im Einklange mit den berühmten Untersuchungen von Helmholtz über das Hören im allgemeinen bestätigt werden.

Anhang.

1) **Anwendung des Schalles zur Bestimmung der Meerestiefe.** Die Tiefenmessung im Meere ist bei beträchtlichen Tiefen in Wirklichkeit schwieriger, als es erscheinen möchte. Deshalb ist der Erfindung des norwegischen Ingenieurs Berggraf große Beachtung zu schenken, die es ermöglicht, in sehr sinnreicher und dabei einfacher Weise Meerestiefen selbsttätig vom fahrenden Schiffe aus anzuzeigen, ohne dass eine Verbindung zwischen Schiff und Meeresboden besteht. Der Grundgedanke ist derselbe, der es gestattet, die Tiefe eines Schachtes durch die Zeit zu messen, die zwischen der Entsendung eines Tones und dem Wahrnehmen seines Widerhalls vergeht. Wie wir der „Revue technique" vom 10. Mai 1905 entnehmen, ist der neue Tiefenmesser folgendermaßen eingerichtet. An jeder Seite des Schiffskörpers ist ein Sprachrohr angebracht, das oben mit einer dem Schiffe zugekehrten Membrane versehen ist. Eine in langsamer Drehung befindliche Scheibe schließt bei jeder Umdrehung mittelst Kontaktstifts einen elektrischen Stromkreis, der ein Uhrwerk bewegt, und versetzt dabei gleichzeitig die Membrane des Tonentsenders in Schwingung. Die Schallwellen pflanzen sich bis zum Meeresboden fort, werden zurückgeworfen und von dem Sprachrohre des Tonempfängers aufgenommen, dessen Membrane, mit einer fernsprechartigen Vorrichtung verbunden, den Stromkreis unterbricht. Die zwischen Tongebung und Tonempfang verflossene Zeit wird demnach am Uhrwerk gemessen, wobei das Zifferblatt so eingerichtet ist, dass die Gradeinteilung der Tiefenmeterzahl entspricht, die in der betreffenden Zeit vom Schalle erreicht worden ist. Die Eichung des Zifferblattes ist zuvor durch genaue Versuche vorgenommen worden. Außer der Ablesung am Zeiger des Zifferblattes ist mit dem Tiefenmesser eine Aufzeichenvorrichtung verbunden, wobei ein Stift auf einen sich abwickelnden Papierstreifen in einem bestimmten Maßstabe die überfahrenen Tiefen selbsttätig aufzeichnet. Ist die überfahrene Tiefe so gering, dass eine meßbare Zeit zwischen Schließen und Oeffnen des Stromkreises nicht vorhanden ist, so ertönt eine Lärmklingel; diese kennzeichnet also die Untiefen der durchfahrenen Strecke. Für die Anfertigung von Seekarten wird der Berggrafsche Tiefenmesser von großer Bedeutung sein.

2) **Ein Apparat zur Erzeugung stehender Wellen an Fäden; von A. Lehnebach.** Derselbe besteht (Fig. 649a) aus einem Wagner'schen Hammer A (von 11 cm Breite und 14 cm Höhe), dessen Kontaktschraube B von ziemlich kleiner Ganghöhe dazu dient, die Stromunterbrechung nach Wunsch zu regulieren. An dem Hammerkopfe ist ein ca. 4 mm breiter und 2 mm dicker, rechtwinklig nach oben gebogener Messingarm angelötet, der andererseits durch ein Gelenk mit einem rechtwinkligen Hebel in Verbindung steht. Der Unterstützungspunkt

des Hebels ist eine kleine Stahlachse, welche in dem auf dem Fußbrette befestigten Lager C ruht. In das Fußbrett sind weiter zwei Messingröhren von 1 m Länge in einem Abstande von 8 cm voneinander eingeschraubt und diese oben mit einem posaunenartigen Röhrenauszuge versehen, der zur einseitigen Befestigung des Fadens D einen kleinen Wirbel trägt; das andere Fadenende ist am Ende des vertikalen Hebelarmes angeknüpft. Der Röhrenauszug gestattet die Länge des Fadens bis auf zwei Meter zu verändern. Am besten eignet sich zur Sichtbarmachung der Schwingungen auf größere Entfernungen hin ein weißer Seidenfaden von ca. 1 mm Durchmesser (auch eine dünne Metall- oder Darmsaite erfüllt denselben Zweck), und um dieselben möglichst scharf hervorzuheben, schiebt man durch die beiden, an die Röhren angelöteten Halter EF einen Streifen geschwärzter Pappe.

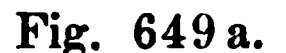
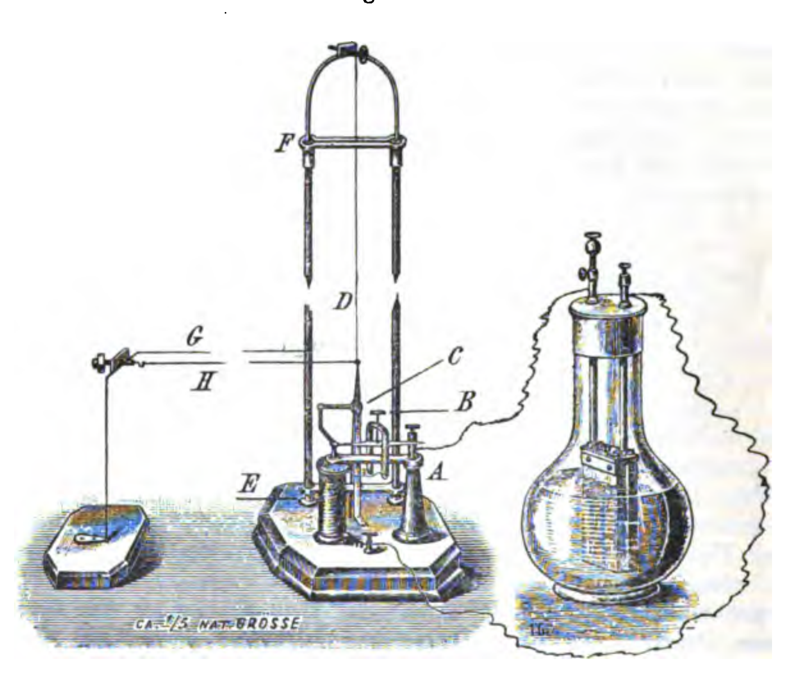


Fig. 649 a.



Wie leicht ersichtlich, werden die stehenden Schwingungen am Faden D durch transversale Impulse hervorgerufen. Um nun zu zeigen, dass auch durch schnell aufeinanderfolgende Bewegungen in der Richtung der Länge stehende Wellen auftreten, ist ein 7 mm dicker Messingdraht G auf 1 m Länge doppelt rechtwinklig umgebogen und in einem Lager an der einen Röhre so angebracht, dass sich die Biegungsstelle, an welcher eine mit einem Haken versehene Schraube verstellbar ist, mit dem Anknüpfungspunkte des Fadens am Hebel in gleicher Höhe über dem Tische befindet. Zwischen Schraube und Hebel läßt sich alsdann ein zweiter Faden H horizontal ausspannen, der übrigens auch die Fortsetzung des vertikalen Fadens bilden kann. Wird nun der Hammer in Tätigkeit gesetzt, wozu schon der Strom eines Bunsen'schen doppelten Tauchelementes von 28 cm Höhe hinreicht und ist die Spannung der Fäden an den beiden Schrauben gehörig reguliert, so treten alsbald an den beiden Fäden

gleichzeitig die stehenden Wellen auf, und die diese lassen sich, wenn der Strom einigermaßen konstant bleibt, lange Zeit unverändert erhalten. Auch die Wellenformen am horizontalen Faden können durch eine hinter denselben gestellte Wand noch mehr dem Auge des Beschauers deutlich gemacht werden.

Wiedemann's Annalen, Band XXIII. Mühlhausen i. Elsass, 1884.

3) **Flammenröhre für akustische Beobachtungen.** Die große Empfindlichkeit, welche mit geringem Ueberdruck brennende Gasflammen gegen Druckänderungen aufweisen, veranlaßte H. Rubens und O. Krigar - Menzel, solche Flammen zum Studium stehender Schallwellen zu benutzen. Sie bedienten sich hierbei eines etwa 4 m langen, 8 cm weiten Messingrohres, welches, horizontal liegend, an dem einen Ende durch eine Messingplatte, am anderen durch eine Schweinsblase verschlossen war; mittelst Posaunenauszuges konnte die Gesamtlänge um 50 cm verändert werden; seitlich mündete ein Ansatzrohr zur Zuführung des Leuchtgases. Auf der höchst gelegenen Seitenlinie des Rohres befand sich eine geradlinige Reihe von etwa 100 Löchern von 2 mm Weite, die in gleichen Abständen in die Rohrwand gebohrt waren. Hat man das Leuchtgas durch das Ansatzrohr etwa 2 Minuten eintreten lassen, so kann man die kleinen Flammen entzünden und den Druck so regulieren, dass die Flämmchen etwa 1 cm hoch sind und mit deutlich erkennbarer gelber Spitze brennen.

Läßt man nun eine Schallquelle in der Nähe der Membran ertönen, so bilden sich in dem Rohre stehende Wellen, welche mit überraschender Schönheit und Schärfe an der verschiedenen Helligkeit und Größe der Flämmchen kenntlich sind. Die ganze Reihe von Flämmchen ist in Abschnitte von der Länge einer halben Welle geteilt, deren Mitte Flammen von einigen Zentimetern Länge und leuchtender Helligkeit enthält, während an ihren Enden die Flämmchen sehr klein und dunkel sind. Ist die Schallerregung sehr kräftig, so entsteht am Rohrende ein Helligkeitsmaximum, und es folgen die übrigen Maxima in Abständen von $^1/_2$; die Flammen sind dabei vibrierend; tönt dagegen der Schall schwächer, so entsteht am Rohrende ein Helligkeitsminimum, und alle Helligkeitsmaxima wandern in die Stellen stärkster Bewegung; die Flammen erscheinen nun vollkommen kontinuierlich.

Während der Resonanz stellt sich ein größerer Gasverbrauch heraus als im stummen Zustande, und die Flammenröhre liefert richtige Werte der Wellenlängen nur für hohe Töne bis zu einer unteren Grenze, welche von der Weite und Zahl der Löcher pro Längeneinheit abhängt.

(Annalen der Physik 1905, F. 4, Bd. 17, S. 149—164.)

Resultate zu den ungelösten Aufgaben.

Aufgabe 217. $s = 6166^2/_3$ m.

Aufgabe 218. $t =$ rund 460400000 Sekunden oder 14,6 Jahre.

Aufgabe 219. $c = 1460$ m.

Aufgabe 220. Bei 0^0 ist $N = 500,6$; bei $- 40^0$ ist $N = 462,5$.

Aufgabe 221. a) Aus $313,9 = x\sqrt{1_1 - 0,003665 \cdot 40}$ ergibt sich $x =$ 339,8 m bei 0^0.

b) Aus $x = 332,4 \cdot \sqrt{1 - 0,003665 \cdot 40}$ folgt $x = 307,1$ m bei $- 40^0$.

Aufgabe 222. $t = ca\ 1000^0$ C.

Aufgabe 223. $t = - 73^0$ C.

Aufgabe 224. $n = 0,009075$.

Aufgabe 225. $c = 347$ m.

Aufgabe 226. a) $c = 430,6$ m. b) $c = 219,1$ m.

Aufgabe 227. a) $n = 627$, also dis^2 (= 615 Schwingungen).

b) $n = 1205$, also dis^3 (= 1230 Schwingungen.)

Aufgabe 228. $s = 0,668$.

Aufgabe 229. $s = 0,54$.

Aufgabe 230. a) Kochsalzlösung $c = 1562$ m,

b) Natronlösung $c = 1584$ m.

Aufgabe 231. a) $\dfrac{101,3}{(4,5 \cdot 332,4)^2 \cdot 1,403} = 0,0000323$.

b) $E = 30980$ kg.

Aufgabe 232. $n = 582$ Schwingungen, entsprechend dem Tone d^2.

Aufgabe 233. $n_1 = 2609$; $n_2 = 774$; $n_3 = 702$, entsprechend den Tönen e^4, g^2 und f^2.

Aufgabe 234. a) $c = 3122$ m. b) $E = 8543$ kg.

Aufgabe 235. Die Schwingungszahlen sind bei 20° 3355, bei 100° 3534 und bei 200° 3124, so daß der Ton von einem hohen 4-gestrichenen *gis* auf a^4 steigt und dann auf g^4 heruntergeht.

Aufgabe 236. Für Gold ist $c = 2103$ m.

Aufgabe 237. a) $c = 3484$ m; b) $c = 3657$ m. c) $n = 2903$; d) $l = 630$ mm; e) $n = 3047$; f) $l = 571$ mm.

Aufgabe 238. n ist 1889 und demnach $c = 5667$ m.

Aufgabe 239. g^4 ist die Quinte von c^4, hat also $^3/_2$ mal soviel Schwingungen wie c^4, welches wiederum 3 Oktaven ($= 2^3 = 8$) höher liegt wie c^1; demnach ist die Schwingungszahl von g^4 $= 8 \cdot {}^3/_2 = 12$ mal so groß als von c^1 und demnach ist c $= 12 \cdot 340$ m oder $c = 4080$ m.

Aufgabe 240. a) $d = 166$ m und b) $d = 830$ m.

Aufgabe 241. Entfernung der beiden Beobachter $y = 664$ m. $x = c/_2 \sqrt{5}$ oder $x = 371{,}2$ m.

Aufgabe 242. a) Der Beobachter spricht eine Silbe in einer $^1/_4$ Sekunde; da er 5 reflektierte Silben hört, so braucht der Schall zur Wand und wieder zurück $^5/_4$ Sekunden, folglich muß die Entfernung zwischen Beobachter und Wand $^5/_8 \cdot 340 = 212^1/_2$ m betragen.

b) Hört der Beobachter aber nur 3 reflektierte Silben, so beträgt die Entfernung nur noch $^3/_8 \cdot 340 = 127^1/_2$ m, folglich hat sich der Beobachter der Wand um $212^1/_2 - 127^1/_2 = 85$ m genähert.

Aufgabe 243. $\sin x : \sin 25^0 = 1 : 3{,}812$; $x = 6^0 22'$.

Aufgabe 244. $\sin 61^0 22' : \sin 35^0 50' = 340 : x$; $x = 226{,}8$ m.

Aufgabe 245. $\sin 60^0 : \sin x = 4{,}3 : 3{,}7$; $x = 48^0 10'$.

Aufgabe 246. $t = 10{,}3$ Sekunden.

Aufgabe 247. $s = 340\left[40{,}66 \pm \sqrt{34{,}66 \cdot 46{,}66}\right] = 340 \cdot 0{,}46 = 156{,}4$ m.

Aufgabe 248. a) 542 Schwing. b) 492 Schwing. c) 543 Schwingungen. d) 493 Schwing. e) 593 Schwing. f) 468 Schwingungen. Bei a) und c) etwas tiefes cis^2, bei b) und d) etwas hohes h^1; e) hohes d^2, f) hohes ais^1.

Aufgabe 249. a) $s_1 = 340\ ({}^5/_4 - 1) = 85$ m. b) $s_2 = 340\ ({}^3/_2 - 1) = 170$ m. c) $s_3 = 340\ (1 - {}^1/_5) = 68$ m. d) $s_4 = 340\ (1 - {}^2/_3) = 113^1/_3$ m.

Aufgabe 250. a) $s_1 = \dfrac{340 \cdot 60}{1035 + 60} = 18{,}63$ m.

b) $s_2 = \dfrac{340 \cdot 60}{1035 - 60} = 20{,}92$ m.

Zusammenstellung der im III. Bande der Akustik vorkommenden Formeln.

I. Formeln für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft.

1. $c = s/t.$ Siehe Seite 3.

2. $c = \sqrt{\frac{E}{d}}.$ Siehe Antwort auf Frage 798, Seite 4.

3. $c = \sqrt{k \cdot \frac{E}{d}}.$ Siehe Antw. auf Frage 799, Seite 9.

4. $c = \sqrt{1{,}409 \frac{E}{d}}.$ Siehe Erkl. 727. Seite 8.

c bezeichnet die Schallgeschwindigkeit und s den in der Zeit t von den Schallwellen zurückgelegten Weg. E ist der Elastizitätsmodul der Luft und d bezeichnet die Dichtigkeit der Luft,

$$k = \frac{Cp}{Cv}, \text{ d. h.}$$

$$k = \frac{\text{spezifische Luftwärme bei konstantem Druck}}{\text{spezifische Luftwärme bei konstantem Volumen}},$$

$$k \text{ oder } \frac{Cp}{Cv} = \frac{332{,}4^2}{280^2} \text{ oder}$$

$$k = 1{,}409.$$

5. $c = \sqrt{\frac{E}{d} \cdot k\,(1 + at)}$ oder

6. $c = 332{,}4 \sqrt{1 + 0{,}003665\ t}.$

7. $c = \sqrt{\frac{gH\sigma}{s} \cdot k\,(1 + at)}.$

(5.–7.) Siehe Seite 10.

v. Helmholtz'sche Formel für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit U eines Tones in einer offenen Röhre:

8. $U = c\left(1 - \frac{\eta}{2R\sqrt{\pi N}}\right).$ Siehe Seite 17.

Formel für die Geschwindigkeit c_0 in trockener Luft, wenn c die Geschwindigkeit in feuchter Luft bezeichnet:

9. $c_0 = c\sqrt{\frac{1 - 0{,}38\frac{f}{H}}{1 + at}}.$ Siehe Seite 18.

$g = 9{,}81$ m ist die mittlere Beschleunigung des freien Falles,
$H = 76$ cm ist die normale Barometerhöhe,
$\sigma = 13{,}596$ ist die Dichte des Quecksilbers,
$s = 0{,}001293$ ist die Dichte der atmosphärischen Luft,
$a = 0{,}003665$ ist der Ausdehnungskoeffizient und
t die Temperatur der Luft,
c ist die Schallgeschwindigkeit in freier Luft,
R ist der Röhrenhalbmesser,
η ist der Reibungskoeffizient zwischen Gas und Röhrenwand,
N ist die Schwingungszahl des gegebenen Tones,
$\pi = 3{,}14159$,
f bezeichnet die Spannkraft des Wasserdampfes und
H den Luftdruck.

Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in zwei verschiedenen Gasen:

10. $c : c_1 = \sqrt{k/s} : \sqrt{k_1/s_1}$ oder

11. $c^2 : c_1{}^2 = k/s : k_1/s_1$ oder wenn

$c_1 = 1$ die Schallgeschwindigkeit in der Luft und

$s_1 = 1$ die Dichte der Luft ist, so ist

12. $c = \sqrt{\frac{k}{s\,k_1}}$.

Siehe Seite 19.

c ist die Geschwindigkeit des Schalles in einem Gase, c_1 dieselbe in der Luft; s ist die Dichte des Gases und s_1 die der Luft; ebenso gilt der schon oben erwähnte Koeffizient k für das Gas und k_1 für die Luft.

II. Formeln für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles durch flüssige Körper.

13. $c = \sqrt{E/d}$ oder

$c = \sqrt{g/\lambda}$.

Siehe Seite 41.

E bezeichnet die Spannkraft oder den Druck auf eine Säule von der Höhe „eins"; d ist ihre anfängliche Dichte; g ist die Intensität der Schwere und λ die Verkürzung dieser Säule unter einem Drucke, welcher ihrem Gewichte gleich ist; $d = s/g$; s = spez. Gewicht.

Formel von Colladon und Sturm:

14. $c = \sqrt{\frac{Pk}{d\,\lambda}}$. Siehe Seite 41.

d ist die Flüssigkeitsdichte im Verhältnis zum Wasser, k die Länge einer Säule unter bekanntem Drucke, λ die Verkürzung dieser Säule für einen gegebenen Druckzuwachs P.

III. Formeln für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in festen Körpern.

15. $c = \sqrt{E/d}$ oder

$c = \sqrt{Eg/s}$.

Siehe Seite 50.

E ist der Elastizitätsmodul, δ die Dichte, s das spezifische Gewicht und $g = 9{,}81$ die Beschleunigung des freien Falles, $d = s/g$.

16. $c = \sqrt{g/\lambda}$. Siehe Seite 51.

λ = die Verlängerung eines Stabes von 1 m Länge, wenn er durch ein dem seinigen gleiches Gewicht ausgedehnt wird.

IV. Formel für die Brechung der Schallstrahlen.

17. $\sin \alpha : \sin \beta = c : c^1$. Siehe Seite 130 und 137.

α ist der Einfallswinkel im ersten Medium, in welchem die Schallgeschwindigkeit $= c$ ist, β ist der Brechungswinkel im zweiten Medium, dessen Schallgeschwindigkeit c^1 ist.

V. Formeln für die Berechnung der Tiefe eines Brunnens.

18. $t = \sqrt{\frac{2x}{g}} + \frac{x}{c}$. Siehe Seite 126.

19. $x = c\left[\left(t + \frac{c}{g}\right) \pm \sqrt{\frac{c}{g}\left(2t + \frac{c}{g}\right)}\right]$.

Siehe Aufgabe 213, Seite 199.

x ist die Tiefe des Brunnens und t die Zeit vom Fallen des Steines bis zu dem Augenblicke, wo man sein Auftreffen hört; $g = 9{,}81$ m ist die Fallbeschleunigung und c die Schallgeschwindigkeit.

VI. Formeln für die Aenderung der Tonhöhe durch Bewegungen.

20. $N = n\left(1 + \frac{s}{c}\right)$.

21. $N = n\left(1 - \frac{s}{c}\right)$.

Siehe Seite 141.

N ist die Zahl der Schallwellen, welche das Ohr des in Bewegung befindlichen Beobachters empfängt, n die Zahl derjenigen, welche der ruhende Beobachter empfängt, s ist der sekundlich vom Beobachter zurückgelegte Weg und c die Schallgeschwindigkeit.

22. $N = \frac{c\,n}{c - s}$.

23. $N = \frac{c\,n}{c + s}$.

Siehe Seite 142.

N ist die Zahl der Wellen bei bewegter Tonquelle, n diejenige bei ruhender Tonquelle, c ist die Schallgeschwindigkeit und s der sekundliche Weg der Tonquelle.

Früher erschienene Bände von Kleyer's Encyklopädie.

Lehrbuch der Grundrechnungsarten. Erstes Buch: **Das Rechnen mit unbenannten ganzen Zahlen.** Mit 71 Erkl. und einer Sammlung von 657 gelösten und ungelösten analogen Aufgaben. Nebst Resultaten der ungelösten Aufgaben. Bearbeitet nach **System Kleyer** von **A. Frömter.** Preis: Mk. 3,—. Geb. Mk. 4.—; in Schuleinband Mk. 3.30.

Lehrbuch der Grundrechnungsarten. Zweites Buch: **Das Rechnen mit benannten Zahlen.** Mit 30 Erklärungen und einer Sammlung von 518 gelösten und ungelösten analogen Aufgaben. Nebst Resultaten der ungelösten Aufgaben. Bearbeitet nach **System Kleyer** von **Frömter** und **Neubüser.** Preis: Mk. 3.—. Geb. Mk. 4.—; in Schuleinband Mk. 3.30.

Lehrbuch der Grundrechnungsarten. Drittes Buch: **Das Rechnen mit unbenannten gebrochenen Zahlen. (Die gemeinen Brüche und die Dezimalbrüche.)** Mit 260 Erklärungen und einer Sammlung von 309 gelösten und ungelösten Aufgaben. Nebst den Resultaten der ungelösten Aufgaben. Bearbeitet nach **System Kleyer** von **J. G. Maier.** Preis: Mk. 3.—. Geb. Mk. 4.—.

Lehrbuch der Grundrechnungsarten mit Buchstabengrössen (Elemente der Buchstabenrechnung), **der Verhältnisse und Proportionen.** Erster Teil: Mit einer Sammlung von 478 gelösten und analogen ungelösten Aufgaben und den Resultaten der letzteren. Bearbeitet von **Prof. H. Staudacher.** Preis: Mk. 5.—. Geb. Mk. 6.—.

Lehrbuch der Grundrechnungsarten mit Buchstabengrössen. Zweiter Teil: **Elemente der Zahlenlehre. Dezimal- und Kettenbrüche und Rechnung mit unvollständigen Zahlen.** Mit einer Sammlung von 277 gelösten und analogen ungelösten Aufgaben. Nebst den Resultaten der letzteren. Bearbeitet von Prof. **Hans Staudacher.** Preis: Mk. 5.—. Geb. Mk. 6.—.

Lehrbuch des bürgerlichen und kaufmännischen Rechnens. Erster Teil: **Die Schluss- und Kettenrechnung (die einfache und zusammengesetzte Regeldetri und der Reesische Satz) nebst Anwendungen.** Mit 100 Fragen, 325 Erklärungen, 63 Anmerkungen, 1250 Aufgaben, 18 Figuren, den Ergebnissen der nicht gelösten Aufgaben und einer **Münz-, Mass- und Gewichtstabelle.** Zum Selbststudium, Nachschlagen, sowie zum Schulgebrauch bearbeitet nach **System Kleyer** von **Dr. Richard Olbricht.** Preis: Mk. 4.50. Geb. Mk. 5.50.

Lehrbuch des bürgerlichen und kaufmännischen Rechnens. Zweiter Teil: **Die Prozent- und Zinsrechnung nebst ihren Anwendungen, mit Einschluss der Diskontrechnung, der Terminrechnung, der Kalkulationen und Kontokorrente.** Mit 130 Fragen, 444 Erklärungen, 27 Anmerkungen, 1520 Aufgaben, zahlreichen schematischen Figuren, einem Formelverzeichnis, einer Fristen- und Zinsenberechnungstabelle, sowie den Ergebnissen der nicht gelösten Aufgaben. Bearbeitet von **Dr. R. Olbricht.** Preis: Mk. 6.—. Geb. Mk. 7.—.

Lehrbuch der Zinseszins- und Rentenrechnung nebst einer Sammlung von 525 gelösten und ungelösten analogen Aufgaben **aus** allen Zweigen des Berufslebens. Von **Ad. Kleyer.** Preis: Mk. 6.—. Geb. Mk. 7.—.

Lehrbuch der Potenzen und Wurzeln nebst einer Sammlung von 3296 gelösten und ungelösten analogen Beispielen. Von **Adolf Kleyer.** Preis: Mk. 6.—. Geb. Mk. 7.—.

Lehrbuch der Gleichungen des 1. Grades mit einer Unbekannten. Sammlung von 2381 Zahlen-, Buchstaben- und Textaufgaben, grösstenteils in vollständig gelöster Form, erläutert durch 230 Erklärungen und 26 in den Text gedruckte Figuren. Von **Ad. Kleyer.** Preis: Mk. 8.—. Geb. Mk. 9.—.

Verlag von L. v. Vangerow in Bremerhaven.

Lehrbuch der ebenen Elementar-Geometrie (Planimetrie). Erster Teil: **Die gerade Linie, der Strahl, die Strecke, die Ebene und die Kreislinie im allgemeinen.** Nebst einer Sammlung gelöster Aufgaben. Mit 234 Erklärungen und 109 in den Text gedruckten Figuren. Von **Ad. Kleyer.** Preis: Mk. 1.80. Geb. nur mit Teil II zus. Mk. 5.—.

Lehrbuch der ebenen Elementar-Geometrie (Planimetrie). Zweiter Teil: **Der Winkel und die parallelen Linien.** Nebst einer Sammlung gelöster Aufgaben. Mit 201 Erklärungen und 113 in den Text gedruckten Figuren. Bearbeitet nach **System Kleyer.** Von **Dr. J. Sachs.** Preis: Mk. 2.20. Geb. nur mit Teil I zus. Mk. 5.—.

Lehrbuch der ebenen Elementar-Geometrie (Planimetrie). Dritter Teil: **Die geometrischen Gebilde und ihre Lagen-Veränderungen. Die einfachen Vielecke.** Nebst einer Sammlung gelöster und ungelöster Aufgaben. Mit den Ergebnissen der ungelösten Aufgaben. Mit 737 Erklärungen und 343 Figuren. Bearbeitet von **Prof. Dr. J. Sachs.** Preis Mk. 6.—. Geb. Mk. 7.—.

Lehrbuch der ebenen Elementar-Geometrie (Planimetrie)). Vierter Teil: **Die Lehre vom Kreis. Die geometrischen Örter und die merkwürdigen Punkte des Dreiecks.** Nebst einer Sammlung gelöster und ungelöster Aufgaben. Mit den Ergebnissen der ungelösten Aufgaben. Mit 529 Erklärungen und 230 Figuren. Von **Prof. Dr. J. Sachs.** Preis: Mk. 6.—. Geb. Mk. 7.—.

Lehrbuch der ebenen Elementar-Geometrie (Planimetrie). Fünfter Teil: **Die Flächen der geradlinigen Figuren.** Nebst einer Sammlung gelöster und ungelöster Aufgaben. Mit den Ergebnissen der ungelösten Aufgaben. Mit 346 Erklärungen und 96 in den Text gedruckten Figuren. Von **Prof. Dr. J. Sachs.** Preis: Mk. 4.—. Geb. Mk. 5.—.

Lehrbuch der ebenen Elementar-Geometrie (Planimetrie). Sechster Teil: **Proportionalität der Strecken.** Nebst einer Sammlung gelöster und ungelöster Aufgaben. Mit den Ergebnissen der ungelösten Aufgaben. Mit 378 Erklärungen und 90 Figuren. Von **Prof. Dr. J. Sachs.** Preis: Mk. 4.—. Geb. Mk. 5.—.

Lehrbuch der ebenen Elementar-Geometrie (Planimetrie). Siebenter Teil: **Die Ähnlichkeit der geradlinigen Figuren.** Nebst einer Sammlung gelöster und ungelöster Aufgaben. Mit den Ergebnissen der ungelösten Aufgaben. Mit 394 Erklärungen und 76 in den Text gedruckten Figuren. Von **Prof. Dr. J. Sachs.** Preis: Mk. 4.—. Geb. Mk. 5.—.

Lehrbuch der ebenen Elementar-Geometrie (Planimetrie). Achter Teil: **Die Anwendung der Ähnlichkeit auf die Lehre vom Kreis.** Nebst einer Sammlung gelöster und ungelöster Aufgaben, mit den Ergebnissen der ungelösten Aufgaben. Mit 505 Erklärungen und 135 Figuren. Von **Prof. Dr. J. Sachs.** Preis: Mk. 5.—. Geb. Mk. 6.—.

Tabelle der Elemente der regelmässigen Vielecke. Von **Prof. Dr. J. Sachs.** Preis: Mk. —.50.

Lehrbuch der räumlichen Elementar-Geometrie (Stereometrie). Erster Teil: **Die Lage von geraden Linien und Ebenen im Raum.** Nebst einer Sammlung gelöster und ungelöster Aufgaben, mit den Ergebnissen der ungelösten Aufgaben. Mit 573 Erklärungen und 174 in den Text gedruckten Figuren. Bearbeitet nach **System Kleyer** von **Dr. H. Seipp.** Preis: Mk. 6.—. Geb. Mk. 7.—.

Lehrbuch der planimetrischen Konstruktionsaufgaben, gelöst durch geometrische Analysis. Erster Teil: **Aufgaben, gelöst ohne Anwendung der Proportionenlehre.** Mit 1952 gelösten und ungelösten Aufgaben, 178 Anmerkungen, 207 Erklärungen und 214 in den Text gedruckten Figuren. Von **E. R. Müller.** Preis: Mk. 5.—. Geb. Mk. 6.—.

